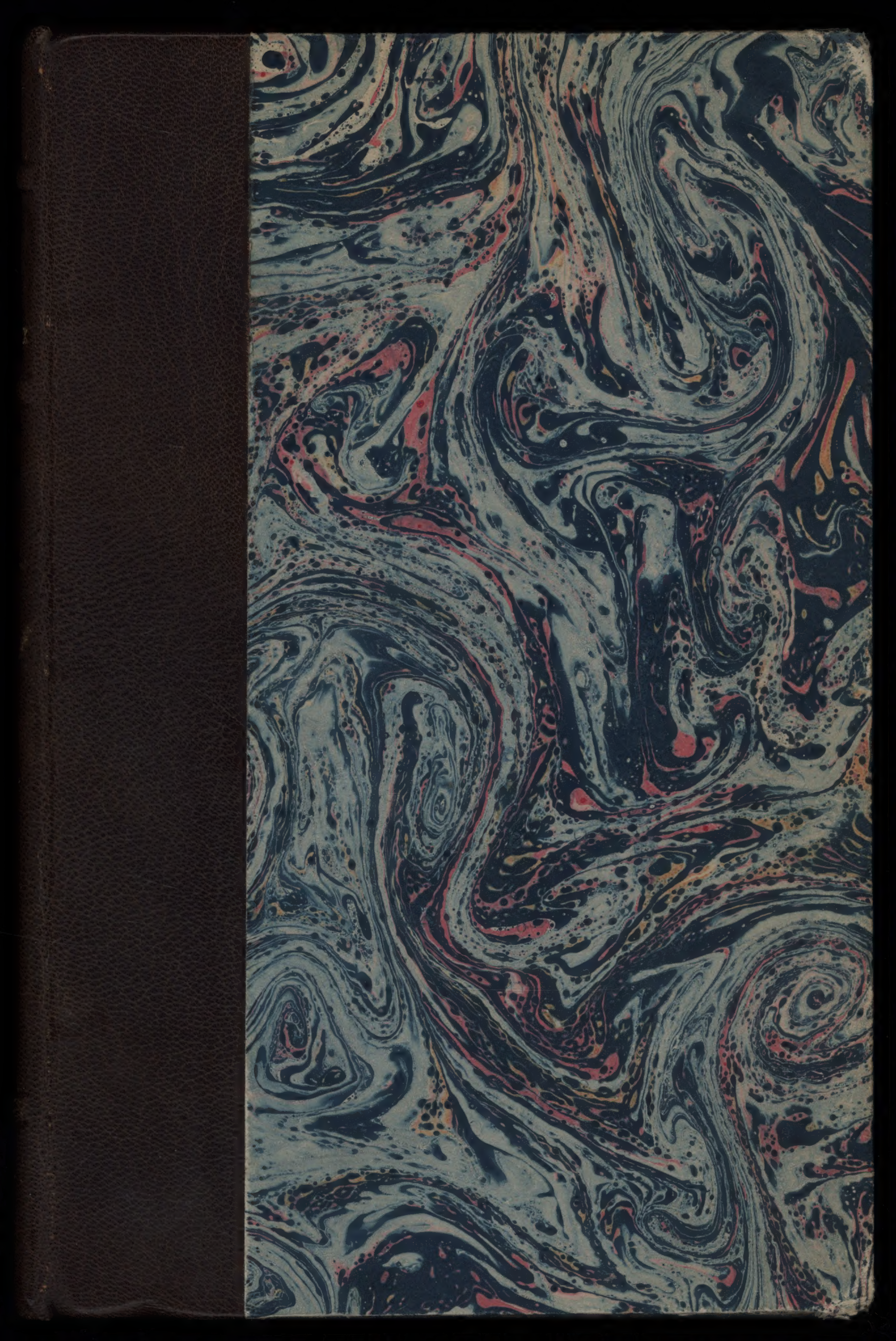
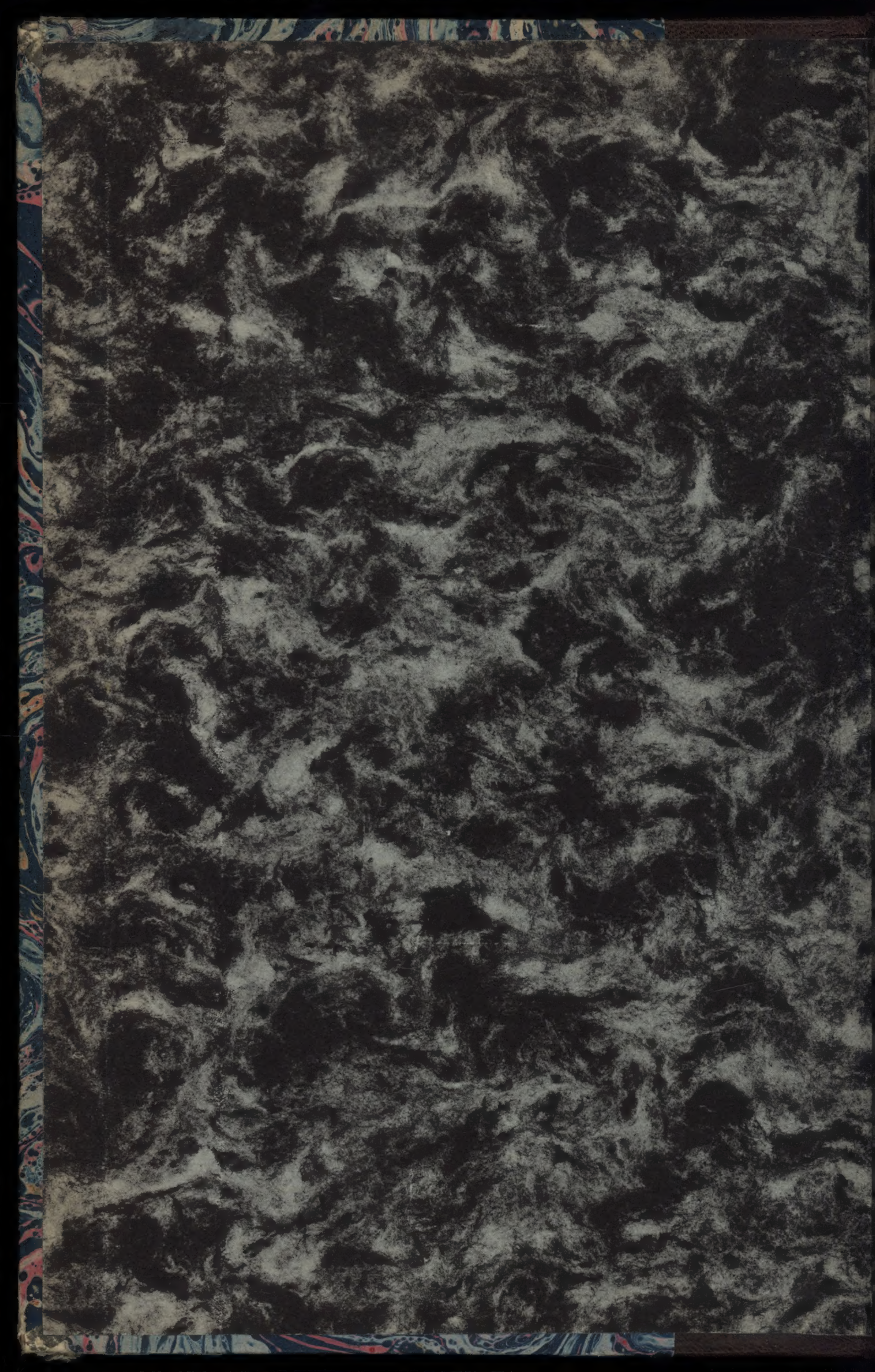
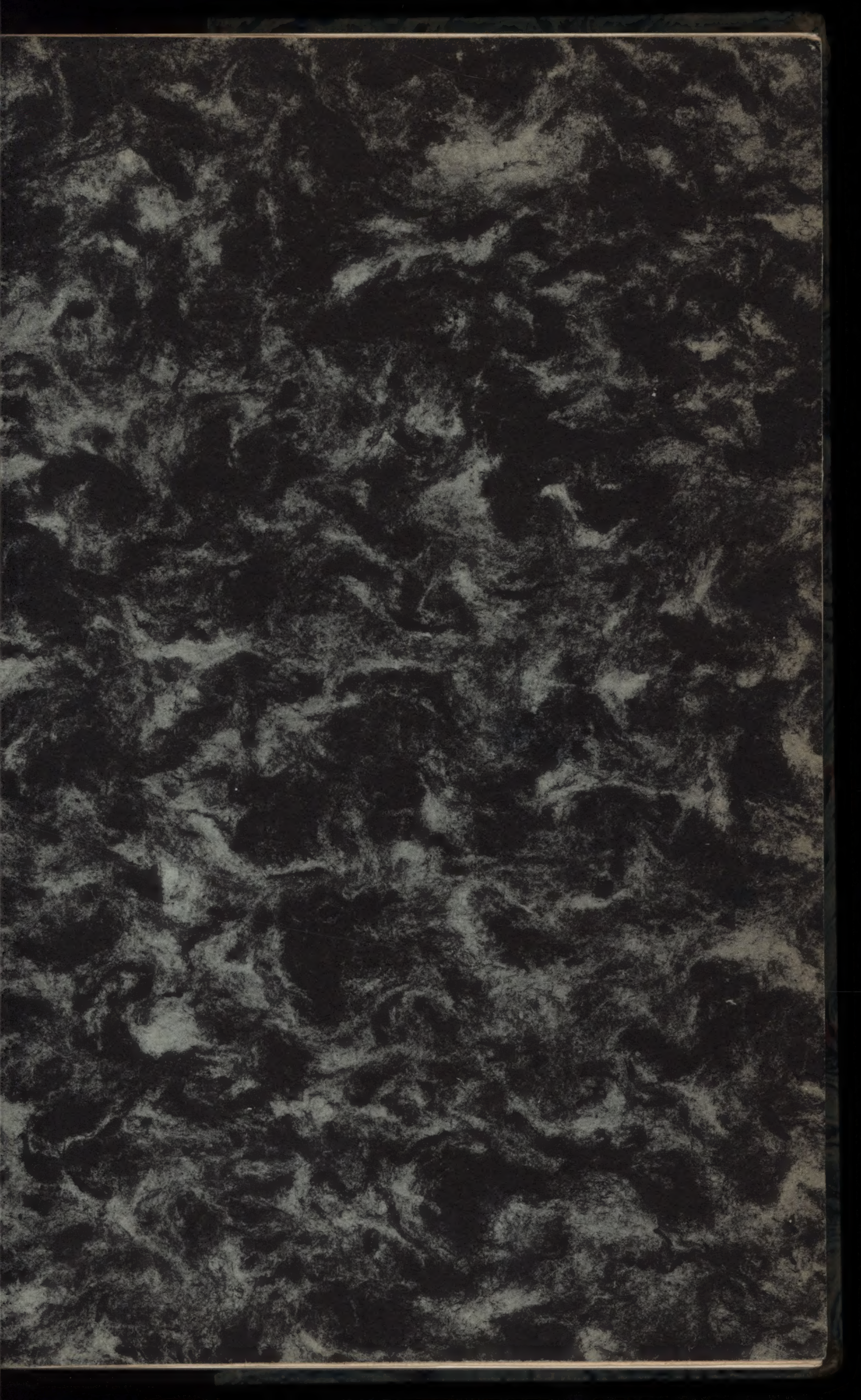






LE

VOL DES OISEAUX

OUVRAGES DU MÊME AUTEUR

Du mouvement dans les fonctions de la vie. Leçons faites au Collège de France, in-8, 480 pages, 144 figures. Paris, 1868. G. Baillière.

Physiologie médicale de la circulation du sang, avec applications aux maladies de l'appareil circulatoire. 1 vol. in-8, 668 pages, 235 figures. Paris, 1863. Adrien Delahaye (épuisé).

La machine animale. Locomotion terrestre et aérienne, 1873. G. Baillière.

Physiologie expérimentale. École pratique des hautes études. Travaux du laboratoire du professeur MAREY. Paris, 1876 à 1880. 4 volumes grand in-8° renfermant environ 700 figures........ 60 fr.

La méthode graphique dans les sciences expérimentales et particulièrement en physiologie et en médecine, par E.-J. MAREY, membre de l'Institut et de l'Académie de médecine. 2e tirage augmenté d'un supplément *sur le développement de la méthode graphique par l'emploi de la photographie*. Paris, 1884. 1 vol. in-8° avec 383 figures dans le texte........ 18 fr. »

Le *supplément* séparément........ 2 fr. 50

La circulation du sang à l'état physiologique et dans les maladies, par E.-J. MAREY, membre de l'Institut et de l'Académie de médecine. 2e édition. Paris, 1881. 1 vol. gr. in-8° de 745 pages, avec 358 fig. dans le texte... 18 fr.

Les eaux contaminées et le choléra. Mémoire présenté à l'Académie de médecine, par le Dr MAREY, membre de l'Institut. Paris, 1884. Broch. in-8. 1 fr. 25

Résultats de l'enquête sur l'épidémie de choléra en France en 1884. *Rapport présenté à l'Académie de médecine, au nom d'une Commission*, par M. MAREY. Paris, 1885. Broch. in-8°........ 3 fr.

3093-88. — CORBEIL. Imprimerie CRÉTÉ.

PHYSIOLOGIE DU MOUVEMENT

LE

VOL DES OISEAUX

PAR

E.-J. MAREY
Membre de l'Institut et de l'Académie de médecine
Professeur au Collège de France

AVEC 1 PLANCHE ET 164 FIGURES DANS LE TEXTE

PARIS
G. MASSON, ÉDITEUR
LIBRAIRE DE L'ACADÉMIE DE MÉDECINE
120, Boulevard Saint-Germain, en face de l'École de Médecine

M DCCC LXXXX

PRÉFACE

Le vol des oiseaux a toujours éveillé la curiosité des chercheurs. Pour le physiologiste, ce genre de locomotion est un des phénomènes les plus intéressants, mais aussi un des plus mystérieux que la Nature offre à ses études ; pour le mécanicien, l'explication de la locomotion aérienne est un des plus beaux problèmes dont il puisse poursuivre la solution. Mais le sujet présente des difficultés spéciales.

Les mouvements du vol sont, en général, trop rapides et trop compliqués pour que l'œil puisse les saisir. En outre, les lois de la résistance de l'air étant à peine connues jusqu'ici, il eût été impossible autrefois de comprendre comment les ailes de l'oiseau trouvent dans l'air un point d'appui.

On peut aujourd'hui aborder méthodiquement l'étude de la locomotion aérienne : les moyens variés dont la physiologie dispose pour étudier des mouvements que l'observation ne peut saisir sont parfaitement applicables à l'analyse des différents actes du vol. On sait mesurer la force d'un oiseau, compter les battements de ses ailes, déterminer sa trajectoire, en suivre les phases successives, établir enfin les conditions physiologiques et mécaniques de son vol.

Depuis longtemps, d'ingénieux mécaniciens cherchent à créer des appareils au moyen desquels l'homme puisse s'ouvrir un

chemin dans les airs. Les « aviateurs », comme ils s'appellent eux-mêmes, ont mis leurs efforts en commun. En France et à l'étranger, ils ont formé des Sociétés qui publient d'importants travaux. Dans ces bulletins, à côté d'études relatives à l'aérostation ou à la météorologie, on trouve des observations curieuses faites par des voyageurs sur le vol de certaines espèces d'oiseaux, des expériences sur la résistance de l'air, d'ingénieuses théories sur le mécanisme du vol; on assiste au perfectionnement graduel des machines destinées à soutenir dans l'air des corps pesants, et l'on arrive à partager l'enthousiasme de ceux qui saluent déjà la réalisation prochaine de la locomotion de l'homme dans l'air.

Une formule chère aux aviateurs est la suivante : « l'oiseau vole, donc l'homme volera. » Il y aurait, à cet égard, quelques réserves à faire; car les genres de locomotion les plus parfaits que l'homme ait réalisés sont en général obtenus par des moyens assez différents de ceux de la Nature. Il n'en est pas moins intéressant de chercher comment l'oiseau peut se soutenir dans l'air par la seule intervention des forces mécaniques.

En s'associant à l'œuvre des aviateurs, le physiologiste se place toutefois à un point de vue spécial. Pour lui, le mécanisme du vol doit offrir des caractères communs avec les autres formes de la locomotion animale. L'analogie anatomique des organes locomoteurs de l'oiseau avec ceux des animaux terrestres ou aquatiques implique l'existence d'analogies physiologiques; il faut les mettre en lumière.

L'anatomie comparée et la physiologie expérimentale doivent se prêter un mutuel secours, pour éclairer le mécanisme de la locomotion aérienne. On entrevoit déjà le moment où les différents caractères que présente le vol dans les diverses espèces d'oiseaux s'expliqueront par certaines particularités de leur conformation physique.

Les difficultés qu'offre l'analyse des mouvements du vol ne sont pas d'un ordre nouveau pour le physiologiste : il en rencontre d'analogues à chaque instant, car les mouvements qui accompagnent les fonctions de la vie échappent, presque tous, à l'observation directe. Pour les saisir, il faut recourir à différents artifices et créer des appareils aussi délicats que ceux qu'emploient les physiciens.

On a souvent considéré la physiologie expérimentale comme basée sur l'emploi des vivisections ; c'était en restreindre singulièrement le domaine. S'il est vrai que des hommes de génie aient réalisé de grandes découvertes, sans autre instrument que le scalpel, on conviendra qu'une méthode qui jugerait de la fonction d'un organe d'après les troubles qui surviennent quand on l'a détruit ou mutilé, serait bien insuffisante dans le sujet qui nous occupe. La vivisection a cependant révélé quelques faits intéressants. Ainsi, elle a montré qu'en retranchant une grande partie de la surface des ailes d'un oiseau, en rognant par exemple la moitié de la longueur des rémiges, on n'abolit pas le vol, mais qu'on en change le caractère. Elle a fait voir également que la queue de l'oiseau n'est pas indispensable à la direction du vol, car si on le prive de cette espèce de gouvernail, il y supplée par certains artifices.

Peut-être la vivisection trouvera-t-elle un jour, dans l'étude du vol, quelque application qu'on ne saurait prévoir ; mais, pour le moment, elle doit céder la place à des méthodes plus délicates et plus précises. Ces méthodes présentent en outre l'inappréciable avantage de respecter l'intégrité des organes et de n'amener aucun trouble dans la fonction qu'elles servent à étudier : de ce nombre sont la *méthode graphique*, la *chronographie*, l'*analyse optique des mouvements* et les diverses applications de la *photographie instantanée*.

La *méthode graphique* a fait réaliser de grands progrès dans

la connaissance des mouvements organiques. Elle a montré, par exemple, que la pulsation du cœur et le pouls des artères, qui ne se traduisent à nos sens que par des chocs presque imperceptibles, sont en réalité des phénomènes compliqués : certains appareils les enregistrent sous forme de courbes dont les inflexions variées ont pour le physiologiste un sens précis[1].

Avec la *chronographie*, les infiniment petits du temps n'échappent plus à nos investigations : on inscrit les vibrations d'un diapason, on en mesure la durée et les phases; et cette durée, à son tour, sert d'unité pour mesurer les actes rapides. Le millième de seconde battu par un diapason remplace, dans ces mesures, les lentes oscillations du balancier d'une horloge. C'est d'après cette nouvelle unité qu'on a évalué le temps qu'une onde de sang lancée par le cœur met pour arriver à l'artère carotide, à la radiale ou à la pédieuse; le temps, bien moindre encore, que met la volonté pour parcourir une certaine longueur d'un nerf moteur. La chronographie permet donc de mesurer les durées et les rythmes de certains mouvements fort compliqués de la locomotion animale : la durée et les phases du coup d'aile d'un oiseau par exemple.

L'*analyse optique* revêt les formes les plus variées : tantôt, utilisant la propriété qu'a notre rétine de conserver pendant quelques instants l'impression qu'elle a reçue, elle nous montre, sous forme d'une ligne brillante, la trajectoire que parcourt la pointe de l'aile d'un oiseau ou d'un insecte. Tantôt, à la lueur instantanée d'une étincelle électrique, elle nous fait voir immobile, dans l'une de ses attitudes successives, un animal qui exécute en réalité des mouvements très rapides. D'autres fois, à travers les trous percés dans un disque tournant, elle nous fait suivre les phases ralenties des mouvements périodiques les plus compliqués.

1. Voir pour les applications diverses : *La méthode graphique dans les sciences expérimentales*. Paris, G. Masson, 1884.

Enfin, la *photographie instantanée* se prête de maintes façons à l'étude du mouvement des animaux, dont elle fixe, en moins d'un millième de seconde, chacune des phases successives. Elle représente ainsi l'animal dans ses différentes attitudes et dans les différents lieux de l'espace qu'il occupait à des instants connus.

On voit, par cette énumération rapide, les ressources dont l'expérimentation dispose pour l'*analyse cinématique* des mouvements du vol. Mais, pour en comprendre les effets mécaniques, une autre méthode est nécessaire, la *synthèse* qui reproduit l'effet de ces mouvements. Sans être encore arrivé à imiter d'une manière complète le vol de l'oiseau, on en a reproduit toutefois certains actes partiels. Ainsi le coup d'abaissement de l'aile, le glissement sur l'air d'un appareil ailé dont le poids et la surface sont convenablement choisis, les différentes directions que prend le vol d'un appareil de ce genre dont les formes ne sont pas parfaitement symétriques, etc., sont autant de problèmes plus ou moins complètement résolus. Ces synthèses partielles sont les étapes qui mèneront méthodiquement à une reproduction plus complète du vol des oiseaux. Cette imitation a déjà donné, entre les mains d'habiles constructeurs, des résultats fort encourageants.

Du reste, pour faire progresser l'imitation synthétique des phénomènes du vol, les méthodes analytiques dont il vient d'être question sont d'un très grand secours. C'est en soumettant à l'analyse optique ou à la *chronophotographie* les appareils mécaniques destinés à imiter les actes du vol, qu'on saisit, dans leur fonctionnement, des imperfections que l'œil serait incapable d'apercevoir. De sorte que l'incessant contrôle de l'analyse doit guider les tâtonnements de la synthèse.

Quand un phénomène mécanique est parfaitement étudié, on en peut, le plus souvent, formuler la théorie mathématique; cela

a été fait pour la fonction de presque toutes les machines. Mais les essais qui ont été tentés jusqu'ici, pour donner une théorie mathématique du vol, étaient prématurés. En effet, tout calcul, sous peine de conduire à des résultats erronés, doit être basé sur des données précises, empruntées à l'observation ou à l'expérience; or ces éléments faisant presque entièrement défaut en ce qui concerne le vol des oiseaux, on doit considérer les calculs faits jusqu'ici comme très peu dignes de confiance. Cette opinion est d'ailleurs celle de mathématiciens très autorisés.

Il est même probable que pendant longtemps encore cette question, comme la plupart des problèmes que poursuivent les physiologistes, s'éclairera surtout par l'expérimentation. Supposons, en effet, les mouvements de l'oiseau parfaitement connus; nous ne posséderons encore que la *cinématique* du vol, mais l'explication mécanique de ces mouvements exigera en outre une parfaite connaissance de la résistance que les ailes rencontrent dans l'air. Or les recherches des physiciens sur la résistance de l'air n'ont encore été faites que dans des conditions très simples; elles ont porté sur des plans minces, rigides, de formes géométriques bien définies : ces plans étaient toujours orientés de la même manière, par rapport à la direction de leur mouvement ; enfin leur vitesse était uniforme. Ces mesures de la résistance de l'air ne peuvent s'appliquer, sans de nombreuses corrections, aux mouvements de l'aile d'un oiseau. En effet, au lieu d'un plan mince et d'étendue constante, nous avons affaire à une surface gauche, de forme très compliquée, dont l'étendue varie suivant le degré de déploiement de l'aile, et dont la forme, au lieu d'être immuable, se modifie sous l'influence des résistances qu'elle éprouve. En outre, cette surface est animée d'un mouvement varié, et son inclinaison par rapport à la direction de ce mouvement est incessamment changeante.

On pourrait citer des exemples semblables, à propos de tous

les phénomènes de la mécanique animale; ils montreraient combien doit être discrète l'intervention des mathématiques en physiologie. En ce qui concerne le mécanisme du vol, il nous semble que le rôle des mathématiques doit se réduire à des calculs fort simples, tels qu'on en peut faire sur les masses et leurs vitesses, pour estimer les forces et le travail dépensé dans le vol; à des considérations géométriques sur les déplacements du centre de gravité dans les différentes attitudes, sur le point d'application de la résistance de l'air, sur la composition des forces, etc. Encore ces calculs, pour conduire à des résultats dignes de confiance, doivent-ils s'appuyer sur des expériences très précises. C'est pourquoi il faut s'attacher surtout à perfectionner les méthodes qui doivent analyser les actes *cinématiques* du vol.

La méthode inverse a été trop longtemps suivie. Des lois générales de la mécanique, on a cru pouvoir déduire les actes du vol; alors on a prêté à l'oiseau des mouvements qu'il n'exécute pas, et parfois même que sa conformation anatomique ne lui permettrait pas d'accomplir. Je ne m'attarderai pas à retracer l'histoire des théories du vol ni des discussions qu'elles ont soulevées. Parmi les opinions contradictoires qui ont été émises, on ne doit retenir que celles dont l'expérience a démontré la justesse.

Il y a vingt ans, j'avais déjà entrepris, sur le mécanisme du vol des insectes et des oiseaux, quelques études expérimentales au moyen de la méthode graphique. Ces expériences ont été publiées dans différents recueils et résumées dans un ouvrage consacré à la physiologie de la locomotion : *La machine animale*. Depuis lors, mes études avaient été dirigées vers d'autres objets.

Mais en 1882, quand j'eus trouvé dans la *photochronographie* le moyen d'analyser les mouvements les plus rapides, il me parut intéressant, pour éprouver la puissance de cette méthode,

de la mettre aux prises avec l'un des problèmes les plus difficiles à résoudre et de lui demander la détermination des actes mécaniques du vol. Non seulement mes nouvelles expériences confirmèrent les résultats que la méthode graphique m'avait donnés, mais elles y ajoutèrent des renseignements de haute valeur. Ainsi elles montrèrent les déformations des ailes, les mouvements individuels des rémiges, les variations de la vitesse de l'oiseau et la trajectoire des diverses parties de son corps aux différents instants d'un coup d'aile. Les documents fournis par la nouvelle méthode ont été assez complets pour que j'aie pu reproduire, au moyen de figures en relief, les attitudes successives de l'oiseau, aux différentes phases d'un coup d'aile.

La cinématique du vol peut désormais être considérée comme établie. Les perfectionnements qu'on apportera dans la construction des appareils y feront à coup sûr découvrir de nouveaux détails; les expériences, répétées sur un grand nombre d'espèces d'oiseaux, révéleront d'intéressantes variétés dans leur manière de voler. Mais le moment semble venu d'exposer l'état de la question et d'appeler l'intérêt des chercheurs sur un problème dont la solution mérite tous leurs efforts.

Ce que l'on sait aujourd'hui sur ce sujet a exigé le concours des observateurs, des anatomistes, des physiologistes et des mécaniciens. La question a même été grandement éclairée par les travaux de ceux qui, sans se préoccuper des moyens employés par la Nature, ont cherché à réaliser, au profit de l'homme, la locomotion mécanique dans l'air.

C'est l'histoire du développement graduel de nos connaissances sur le vol des oiseaux que j'ai essayé de retracer dans cet ouvrage.

Dans la *première partie* sont exposées les particularités que l'observation seule des oiseaux a fait connaître. On y trouvera

également les théories, de moins en moins imparfaites, émises successivement par les naturalistes ; enfin les découvertes des anatomistes et des zoologistes, qui éclairent les conditions mécaniques du vol.

La *deuxième partie*, consacrée à la physiologie expérimentale, comprend les recherches sur la force musculaire de l'oiseau et les expériences qui ont servi à déterminer la nature et la succession de ses mouvements.

Dans la *troisième partie*, le problème est abordé au point de vue mécanique. On y essaie d'évaluer les forces qui agissent sur l'oiseau pour le soutenir et pour le propulser dans l'air. Puis on étudie successivement une série de problèmes partiels et en particulier le coup d'aile proprement dit, la force qu'il exige, la résistance qu'il trouve dans l'air, les réactions qu'il imprime à la masse de l'oiseau. Cette étude n'est pas seulement faite au point de vue mécanique, elle s'éclaire beaucoup de la comparaison du vol avec les autres formes de la locomotion animale, car toutes ces formes, terrestres, aquatiques, etc., présentent entre elles quelques ressemblances.

Enfin, dans la *quatrième partie*, il sera question du vol *plané* et du vol *à voile :* formes étranges où l'aile est passive et immobile, tandis que l'air agit pour la soulever, comme il ferait d'un cerf-volant.

Ces deux genres de vol, qui semblent si simples dans leur mécanisme, puisque l'oiseau n'a qu'à se laisser porter par l'air, sont toutefois les plus mal connus jusqu'ici. Cela tient à ce qu'ils échappent à l'expérimentation. Le vol à voile surtout, ne se produisant que dans certaines conditions exceptionnelles, n'a été vu que par un petit nombre d'observateurs. En l'absence de toute théorie satisfaisante pour l'expliquer, les mécaniciens se sont longtemps bornés à en nier l'existence; mais d'importantes études, faites dans ces dernières années,

en attestent la réalité et en font même entrevoir l'explication mécanique.

Il ne sera pas question, dans cet ouvrage, du vol des insectes que j'ai soumis autrefois à la méthode graphique et à l'analyse optique. J'ai déjà fait de ce genre de vol l'objet de diverses publications; mais je ne lui ai pas encore appliqué les nouvelles méthodes exposées ici et qui promettent d'en montrer tous les détails. Peut-être pourrai-je un jour reprendre ce sujet avec les développements qu'il mérite.

20 juillet 1889.

LE
VOL DES OISEAUX

PREMIÈRE PARTIE

CONNAISSANCES ACQUISES SUR LE VOL DES OISEAUX PAR LES OBSERVATEURS, LES ANATOMISTES ET LES ZOOLOGISTES

CHAPITRE PREMIER

OBSERVATIONS SUR LE VOL DES OISEAUX

Observations des anciens. — Fauconniers.— Vol ramé et vol à voile. — Voyageurs et naturalistes. — Évolutions des oiseaux dans le vol ramé : carrières et degrés, passades, chute foudroyante, ressource, pointe, etc. — Manœuvres des oiseaux voiliers : saut au moment de l'essor, route par bordées, plongées, vol à tire-d'aile. — Doutes émis sur la réalité du vol à voile; hypothèses de courants d'air ascendants. — Définition du vol à voile : nécessité du vent pour qu'il soit possible. — Attitude des ailes et de la queue de l'oiseau dans le vol à voile. — Observations de Basté sur le vol à voile. — Observations de Bakounine. — Insuffisance de l'observation; projets d'expériences sur le vol à voile.

Le temps, qui efface le souvenir des plus grands événements, en dénature certains autres et les amplifie parfois d'une manière démesurée. La légende prête à Dédale l'invention d'ailes qui

lui permirent de s'enfuir du labyrinthe de Crète avec son fils l'imprudent Icare; elle attribue à Archytas la construction d'une machine en forme de Colombe qui s'envolait par les airs. On pourrait croire, d'après ces récits, que le mécanisme du vol était parfaitement connu des anciens; mais une critique basée sur la raison accorde à Dédale la gloire d'avoir imaginé la voile des navires, à Archytas[1] l'invention du cerf-volant.

§ 1. **Observations des anciens.** — Si l'on en juge par les textes qui nous sont parvenus, l'antiquité n'avait même pas observé avec beaucoup de soin le vol des oiseaux.

Aristote se borne à dire que le vol s'effectue par le mouvement des ailes qui s'ouvrent et se ferment tour à tour, et que la queue de l'oiseau agit à la façon d'un gouvernail. Il ajoute que, chez les espèces dont la queue est peu développée, le rôle de gouvernail est rempli par les jambes qui s'étendent fortement en arrière, comme cela se voit chez les Cigognes.

Pline l'Ancien fut un observateur sagace; il nota les différents caractères de la marche des oiseaux sur le sol et fit au sujet du vol cette remarque importante, que l'oiseau, avant de s'envoler, cherche d'abord à acquérir une certaine vitesse, soit en sautant, soit en courant ou en se laissant tomber d'un lieu élevé. Le Canard seul, dit-il, fait exception à cette règle, car il s'envole en s'élevant directement de la surface des eaux.

Galien a indiqué le premier que les oiseaux se maintiennent parfois dans les airs, sans battements d'ailes.

Mais pour trouver d'importantes observations sur les évolutions du vol, il faut se reporter aux écrits plus récents qui traitent de la fauconnerie.

§ 2. **Fauconniers.** — L'art de la fauconnerie est fort ancien, mais il prit au moyen âge une grande faveur chez toutes les nations de l'Europe; il est encore pratiqué en Afrique et chez quelques peuples de l'Orient. Sans cesse occupés à perfectionner

1. Archytas, 400 ans avant notre ère, savant, homme d'État et grand capitaine, fut un des maîtres de Platon. On lui doit l'invention de la poulie et de la vis.

leur art, les fauconniers ont acquis et se sont transmis d'âge en âge d'importantes notions sur les caractères du vol des différentes espèces d'oiseaux, sur les manœuvres que les unes emploient pour atteindre leur proie, les autres pour échapper à leurs ennemis. Ils ont enseigné l'art de maîtriser les Faucons au moyen du chaperon, celui de remettre à neuf leur plumage lacéré en y entant d'autres plumes. Enfin ils ont observé et décrit, avec un soin minutieux, les évolutions diverses que pratiquent les oiseaux de proie chasseurs.

C'est aux fauconniers qu'on doit la distinction capitale des deux types de vol très différents : le *vol ramé,* procédant par coups d'ailes successifs, et le *vol à voile,* dans lequel l'oiseau se transporte par la seule force du vent. Huber[1], dans un admirable petit livre, résume parfaitement les observations des fauconniers.

§ 3. **Voyageurs et naturalistes.** — De nos jours, c'est l'esprit de curiosité, l'ardeur pour les sciences naturelles, le désir et l'espoir de découvrir les lois de la locomotion aérienne qui poussent certains hommes à observer les mœurs des oiseaux et à étudier leur vol.

Audubon a passé une grande partie de sa vie à courir les bois et les plaines d'Amérique pour y trouver les éléments de sa belle iconographie des oiseaux[2]. Par lui, nous connaissons les mœurs et le genre de vol d'un grand nombre d'espèces observées en liberté, dans les circonstances les plus variées. Lorsqu'Audubon décrit certains spectacles dont il a été témoin, la migration des Pigeons, par exemple, le vol de la Frégate, l'Aigle à tête blanche poursuivant sa proie, ses récits sont pleins d'intérêt; il y joint des remarques importantes sur les caractères du vol.

D'Esterno[3], dans son intéressant ouvrage, montre combien on peut faire d'utiles observations sur les espèces d'oiseaux

1. Huber, *Observation sur le vol des oiseaux de proie*. Genève, 1784.
2. Audubon, *Oiseaux d'Amérique. Biographie ornithologique.*
3. D'Esterno, *Du vol des oiseaux*, 2e édition. Paris, 1865, à la Librairie Nouvelle.

les plus vulgaires. Porté par la nature de son esprit à interpréter les faits qu'il constate, il a cherché à tracer les principales lois du vol ramé et du vol à voile. L'apparition de son livre a été un véritable événement pour tous ceux qu'intéresse la locomotion aérienne.

Depuis un siècle surtout, on a fait sur le vol des oiseaux des travaux importants. A l'étranger comme en France, on a abordé scientifiquement l'étude des organes du vol, la physiologie et le mécanisme de la locomotion aérienne. Des Revues spéciales ont été fondées en vue de centraliser les travaux de cette nature. Il faut puiser à toutes ces sources pour exposer l'état actuel de la question et pour montrer sur quels riches documents on peut asseoir déjà la théorie du vol des oiseaux.

Dans l'exposition des résultats obtenus par les différents observateurs, une difficulté se présentait, celle de classer méthodiquement des faits de provenances et de natures très variées. La marche la plus naturelle consiste à décrire d'abord les grandes évolutions des oiseaux dans le vol ramé et dans le vol à voile, leurs mouvements d'ensemble, l'ordre dans lequel ils se groupent pour voyager, en un mot ce qui attire tout d'abord l'attention des observateurs. Ensuite viendront les détails des mouvements de l'aile, autant du moins que l'œil peut les saisir; enfin les caractères qu'imposent au vol de l'oiseau les différentes conditions extérieures dans lesquelles il se meut.

§ 4. **Évolutions des oiseaux dans le vol ramé.** — C'est aux traités de fauconnerie qu'il faut emprunter la description des manœuvres diverses que les oiseaux rameurs emploient dans leurs chasses. Parmi les rameurs, *oiseaux nobles* ou de *haute volerie*, les plus employés étaient les Faucons, le Gerfaut et le Sacre.

Le mode de chasse des oiseaux de proie est presque toujours le même : ils commencent par gagner de la hauteur, et quand ils se sont élevés assez haut, se laissent tomber sur leur proie qu'ils frappent de leurs serres.

Or, pour gagner de la hauteur, un Faucon vole toujours contre

le vent ; si faible que soit le souffle de l'air, il sait le reconnaître, et quel que soit, dit Huber, le nombre des Faucons lâchés en un même moment, on les voit tous s'envoler dans la même direction. Le Faucon frappe des coups d'ailes répétés et s'élève sous un angle de 15° à 20° au plus avec l'horizon. Cette ascension a reçu le nom de *carrière;* elle semble coûter à l'oiseau de grands efforts, car si la distance à franchir est trop longue, il la fractionne et interrompt son vol ascendant en cédant au vent, de façon à revenir, sans perdre de hauteur, au-dessus de son point de départ. Sa vitesse est alors triple de celle qu'il avait en

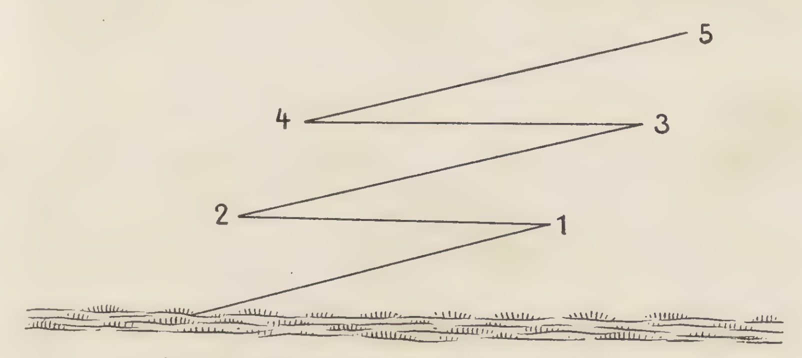


Fig. 1. — Carrières et degrés d'un Faucon (d'après Huber).

montant ; ce temps de vol horizontal se nomme *degré*. De carrières en degrés et de degrés en carrières, le Faucon s'élève à la hauteur convenable pour fondre sur l'animal contre lequel il a *entrepris*. La chute du Faucon du haut des airs est extrêmement rapide : serrant les ailes contre le corps, il glisse suivant une courbe qu'il règle de façon à tomber sur sa proie. S'il la manque, un simple changement d'orientation de ses ailes le fait remonter sur l'air presque à la hauteur d'où il est parti. Cette manœuvre ou *passade* se répète un grand nombre de fois, jusqu'à ce que le Faucon ait lié sa proie et l'ait amenée en culbutant jusqu'à terre où il achève de la mettre hors de combat. De son côté, l'oiseau chassé tente d'échapper au Faucon par une *esquivade*, abaissement soudain ou mouvement de côté; mais la précision avec laquelle

le Faucon dirige son attaque est si grande qu'il manque rarement son but[1].

La chute du Faucon est d'autant plus rapide qu'elle est moins inclinée; parfois l'oiseau fond presque verticalement du haut des airs, *chute foudroyante*. Huber estime que cette descente dure cent fois moins que la carrière ascendante qui l'a précédée. Quant à la remontée ou *ressource* (du latin *resurgere*) qui termine

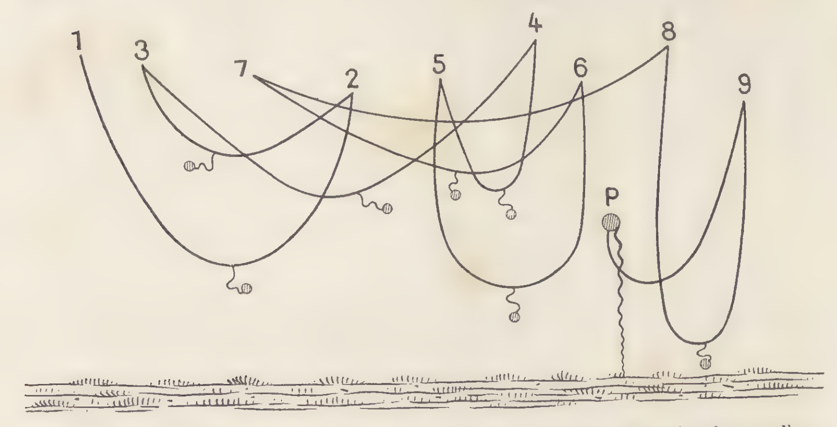


Fig. 2. — Trajectoires suivies par le Faucon dans une série de passades composées chacune d'une chute et d'une ressource. La première passade a lieu de 1 à 2, la seconde de 2 à 3, etc. L'oiseau chassé échappe par une esquivade jusqu'à la neuvième passade qui se termine par une prise, au point P.

la passade, elle est très rapide aussi, de sorte que le Faucon se trouve, en un instant, prêt à recommencer une nouvelle attaque. La figure 2 montre la série de passades du Faucon et d'esquivades de l'oiseau chassé, jusqu'à ce que la prise ait lieu en P, pendant la ressource de la neuvième passade.

1. Cette adresse merveilleuse se montre surtout quand un fauconnier exerce un oiseau à voler un *leurre*, c'est-à-dire quand il le dresse à saisir une proie morte liée à un cordeau et qu'il fait tourner rapidement, d'un mouvement de fronde. A la vue du leurre, l'oiseau qui volait en rond à quelque cent mètres de hauteur se laisse tomber et calcule si bien l'endroit où son but mouvant devra se trouver au bas de la passade, qu'il l'atteint presque à coup sûr. Et si le fauconnier veut esquiver cette atteinte, en tirant brusquement sur la corde, il lui faut beaucoup de prestesse pour déjouer l'adresse du Faucon.

Le phénomène de la ressource avait déjà été décrit par Bélon, mais c'est dans le livre de Huber qu'il est exposé de la façon la plus intéressante ; on y voit les effets alternatifs de la pesanteur et de la vitesse acquise, l'oiseau gagnant dans la descente la *force vive*[1] qui le fera remonter contre la pesanteur, au prix d'un simple changement d'orientation de ses ailes. Ce mouvement, qui agit à la façon d'un coup de gouvernail, redresse la direction de la trajectoire du vol ; il ne semble coûter aucun effort, car les

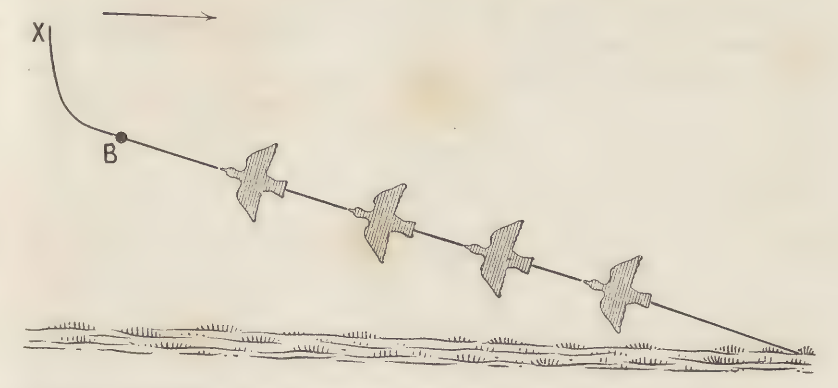


Fig. 3. — *Pointe* effectuée par un Faucon au cours d'une carrière. L'oiseau arrivé en B relève brusquement la direction de son vol et va *trousser* sa proie en X (la flèche indique la direction du vent).

passades du Faucon se succèdent sans interruption jusqu'à ce que la proie soit prise ou se soit mise à l'abri de nouvelles attaques.

Un hhénomène analogue à la ressource est celui que les fauconniers appellent une *pointe*. Il se produit pendant le cours d'une carrière, quand le Faucon passe en dessous de l'oiseau chassé et à courte distance de lui. La vitesse acquise dans une carrière véhémente ou dans un temps de vol horizontal peut se transformer en remontée. Le Faucon suspend alors les battements de ses ailes, les oriente comme pour les ressources et va

1. On appelle *force vive* d'un corps en mouvement le produit de la masse de ce corps par le carré de sa vitesse. C'est par sa force vive qu'un projectile lancé en haut s'élève contre la pesanteur, qu'un pendule, après sa phase descendante, remonte pendant l'autre phase de son oscillation.

atteindre sa proie par dessous : c'est ce qu'on appelle *trousser*.

Les fauconniers savaient reconnaître les qualités de leurs oiseaux de chasse à la fermeté des muscles, à la rigidité des pennes, à la finesse des ailes et à la densité du corps. C'est en effet la pesanteur qui, au moment de la passade, donne à l'oiseau l'extrême rapidité de sa chute et la force vive pour la ressource.

On lit dans la *Fauconnerie de Saint-Aulaire* (1617) : « Faut avoir égard aux poids et pesanteur de l'oiseau d'autant qu'étant pesant sur le poing, selon sa grandeur et espèce, signifie que l'oiseau sera fort et léger. » Comme la finesse de l'aile et le poids du corps étaient des qualités recherchées, on tentait quelquefois de les donner artificiellement aux Faucons de chasse. « Quand l'oiseau est trop léger, on donne à son vol de la force et de la vitesse en raccourcissant sa voilure et en lui donnant du poids à l'aide de lourdes sonnettes. » (*Fauconnerie* de d'Arcussia).

§ 5. **Manœuvres des oiseaux voiliers.** — Les Rapaces qui pratiquent le vol à voile, sont l'Aigle, le Vautour, les Orfraies, les Milans, les Buses, les Harpies. Certains oiseaux dits *voiliers saillants*, l'Autour et l'Épervier, étaient employés à la chasse. Le mot *saillant* veut dire qu'ils sautaient du poing de leur porteur et se laissaient glisser sur l'animal qu'ils devaient prendre. Ces oiseaux, moins pesants que les Faucons et pourvus d'ailes plus larges, mais plus faibles, volaient avec moins de rapidité et n'avaient tous leurs avantages qu'en temps de vent. Ils s'élevaient alors en décrivant des spirales, jusqu'à la hauteur voulue pour descendre sur leur proie. Ce genre de vol tournoyant et sans coups d'ailes s'appelait ascension par *bordées*. Il était suivi d'une chute ou *plongée* dans laquelle l'oiseau accélérait souvent sa descente en battant des ailes, *vol à tire d'aile*. Dans ses bordées, l'Autour, pour ne pas être entraîné trop loin, serrait de temps en temps les ailes et donnait tête baissée dans le vent.

Ces descriptions montrent que le vol à voile était observé avec soin par les fauconniers. Les naturalistes à leur tour l'observèrent sur un grand nombre d'espèces. Audubon dit, en parlant de l'Aigle à tête blanche : « Il plane, les ailes toutes grandes

ouvertes, à angle droit avec l'axe de son corps, et laissant de temps à autre ses jambes pendre de toute leur longueur. Quand il est ainsi en l'air, il peut monter d'un mouvement circulaire, sans un simple battement d'ailes, sans même qu'on les aperçoive remuer, non plus que la queue; et de cette manière il s'élève à perte de vue, sa blanche queue étant la dernière à disparaître. »

§ 6. **Doutes émis sur la réalité du vol à voile.** — Malgré ces témoignages, les physiciens répugnent à admettre qu'un oiseau immobile trouve dans l'action du vent la force capable de le faire remonter contre le vent lui-même. C'est, disent-ils, comme si l'on prétendait qu'un corps inerte jeté dans une rivière peut trouver dans le mouvement de l'eau une force capable de lui faire remonter le courant. Aussi a-t-on fait maintes hypothèses pour expliquer ce genre de vol, en supposant l'existence de courants ascendants, verticaux ou tout au moins obliques, par lesquels le poids de l'oiseau serait soutenu.

§ 7. **Hypothèse des courants d'air ascendants.** — Pénaud, qui a poussé fort loin l'étude mécanique de la locomotion aérienne, croyait que des courants d'air ascendants sont nécessaires pour que le vol à voile se produise. D'autres, se basant sur ce fait, que la direction du vent n'est pas toujours la même à différentes hauteurs, ont supposé que, dans le vol à voile, l'oiseau passait alternativement d'une couche d'air dans une autre et trouvait ainsi des forces capables de le porter dans des directions opposées. J'ai moi-même longtemps résisté à admettre la possibilité du vol à voile, sauf dans des conditions toutes particulières de l'atmosphère.

Depuis lors, j'ai vu des Pélicans s'élever en ramant d'abord, puis sans battements d'ailes, jusqu'à de grandes hauteurs, et là, planer en sens divers, montant et descendant sans donner un coup d'ailes. Des centaines de ces oiseaux se jouaient ainsi pendant des heures entières. Une colonne d'air ascendante existait-elle donc en dessous d'eux? Et quelle force fallait-il supposer à ce souffle vertical, pour qu'il soutînt des oiseaux du poids de 6 ou 8 kilogrammes sur une surface d'ailes de moins d'un mètre?

En somme, les suppositions qu'on a faites pour essayer d'expliquer le vol à voile par certaines particularités de la direction du vent ne rendent même pas compte des faits que rapportent les observateurs. Mieux vaut donc accepter les descriptions qui ont été données de ce genre de vol et des évolutions variées qui l'accompagnent. Du reste, on verra plus loin que la théorie de ces singuliers phénomènes commence à se dégager.

Pour d'Esterno, à moins de fermer les yeux à l'évidence, il faut admettre la réalité du vol à voile, sauf à convenir que nos connaissances actuelles en mécanique n'en donnent pas une explication satisfaisante. Que celui qui doute encore regarde, par un temps de vent, un Milan ou une Buse planant dans les airs. Qu'il s'arme, au besoin, d'une puissante lunette; il verra que l'aile de l'oiseau n'exécute pas le moindre mouvement.

§ 9. **Définitions du vol à voile.** — D'après d'Esterno, il y a, relativement à la nature du vol à voile, une équivoque à dissiper.

« On a confondu, dit-il, avec le vol à voile tous les accidents du vol ramé qui présentent *momentanément* l'appareil immobile et rigide, comme le vol à voile le présente *constamment*. Il arrive, par exemple, que l'oiseau ayant acquis de la hauteur qu'il ne veut pas conserver, la transforme en translation et se laisse glisser sur l'air qu'il ne frappe plus. D'autres fois, il frappe quelques coups d'ailes après lesquels il continue de marcher horizontalement en tenant les ailes étendues et en parcourant sans ramer un espace qui va jusqu'à 40 mètres et plus.

« Dans ces deux cas et dans d'autres semblables, l'oiseau n'obtient aucune production de force; il ne fait que consommer celle qu'il a préalablement acquise; il la consomme, dans le premier cas en perdant de la hauteur, dans le second cas en perdant de la vitesse. »

Les glissements de l'oiseau sur l'air, si bien décrits par Huber sous le nom de *ressource*, n'ont pas besoin de vent pour se produire. Les ailes étendues et inclinées sous un certain angle, supportent le poids du corps par un mécanisme semblable à celui d'un *cerf-volant* qui, dans un air calme, s'enlève et se

soutient quand la traction de la corde lui imprime une vitesse suffisante. Toute la différence consiste en ce que la vitesse du cerf-volant est produite par une traction, celle de l'oiseau par une impulsion préalable.

§ **10. Nécessité du vent pour le vol à voile.** — Le vol à voile, dit encore d'Esterno, a cet inconvénient qu'il ne peut avoir lieu sans vent. Il a cet avantage, qu'empruntant au vent, quand il y en a, une force illimitée, il peut se passer de toute dépense de force de la part de l'oiseau.

On voit souvent, pendant un calme plat, des oiseaux exécuter, dans les régions supérieures de l'air, les évolutions du vol à voile, et cela a fait croire que le vent n'est pas indispensable à ce genre de vol. Mais il faut être prévenu que l'air est de plus en plus agité, à mesure qu'on s'élève sur les couches supérieures de l'atmosphère. Un calme absolu au niveau du sol n'exclut pas l'existence d'une brise sensible à 20 ou 30 mètres plus haut.

Mouillard (1) admet que l'oiseau voilier, en décrivant ses orbes, trouve dans la vitesse de sa translation circulaire le moyen d'utiliser les vents trop faibles pour le soutenir autrement; mais il a vu, par une bonne brise, un Aigle s'élever en *avançant contre le vent* sans donner un coup d'ailes.

« L'oiseau, dit-il, s'élança du sommet d'un frêne où il était perché, s'abaissa au vent de 2 ou 3 mètres, fut relevé par une rafale et s'éleva ainsi, directement, lentement, à une centaine de mètres en l'air, ayant acquis au vent au moins 50 mètres, et cela sans un seul battement. »

Il faut rattacher au vol à voile un phénomène très singulier dont j'ai été plusieurs fois témoin : c'est l'immobilité de l'oiseau dans un même point de l'espace, avec un simple balancement du corps et sans battements d'ailes. Une Crécerelle m'a donné ce spectacle, à plusieurs années d'intervalle et dans la même localité. Vue à la lunette, elle se tenait les ailes demi-fléchies, le bec au vent qui soufflait avec force. Ajoutons toutefois que l'oiseau

(1) Mouillard, *L'empire de l'air*. Paris, 1887.

était, dans ces deux cas, à quelques mètres au-dessus de la cime de peupliers. On peut supposer que le vent réfléchi sur ce rideau d'arbres prenait une direction ascendante capable de soutenir l'oiseau[1].

Que de fois n'ai-je pas vu sur la côte du Pausilippe les Goélands voler à voile quand il faisait grand vent !

C'est particulièrement par le vent de Nord-Est que les évolutions de ces oiseaux sont faciles à saisir en cet endroit. Tous font alors la même manœuvre, soit par groupes, soit isolément : ils remontent lentement le fil du vent, puis le redescendent à grande vitesse. Dans la remontée, le Goéland ne donne pas un coup d'aile, seulement il présente un léger balancement, comme celui d'un acrobate marchant sur la corde raide. Les ailes courbées en arc et légèrement serrées auprès du corps, quand la tempête souffle avec grande force, l'oiseau s'avance contre le vent. Il ne perd pas de sa hauteur d'une manière sensible; parfois même il s'élève sans donner de coups d'ailes. Mais ce qui est tout à fait remarquable, c'est l'extrême lenteur de sa progression contre le vent : il met souvent plusieurs secondes à parcourir 1 mètre; d'autres fois sa vitesse est de 2 à 3 mètres à la seconde.

A côté de ces oiseaux qui remontent le vent, on en voit d'autres qui le redescendent et se laissent emporter avec une vitesse extrême, 30 ou 40 mètres et plus à la seconde. Le corps et les ailes reçoivent obliquement le vent par leur face inférieure; les ailes sont largement déployées et donnent de rares battements.

Les changements de direction se font par courbes d'un grand rayon, dans lesquelles l'oiseau présente obliquement au vent la face inférieure de son corps et de ses ailes.

§ 11. **Attitudes des ailes pendant le vol à voile.** — Quand les oiseaux de proie, Buses ou Milans, décrivent en l'air leurs

1. Il faut bien distinguer ce planement avec immobilité, du vol sur place que les mêmes espèces pratiquent fréquemment. Pour peu que la brise souffle, les oiseaux de proie se tiennent longtemps le bec au vent, *battant rapidement des ailes*. Ils semblent en observation, car ils ne quittent guère cette attitude que pour descendre à terre sur quelque proie.

orbes sans donner un seul coup d'aile, on observe toujours chez eux la même attitude que Mouillard a fort bien représentée. Les

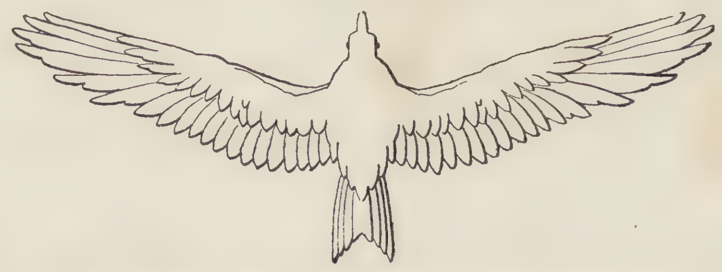


Fig. 4. — Aspect d'un oiseau qui plane en s'élevant sur l'air; la pointe des ailes est portée en avant.

ailes sont largement déployées et portées en avant, comme le montre la figure 4. Au contraire, l'oiseau qui avance en ligne



Fig. 5. — Attitude de l'oiseau qui glisse rapidement sur l'air; la pointe des ailes est portée en arrière.

droite contre le vent, ou qui, profitant de sa hauteur acquise, se

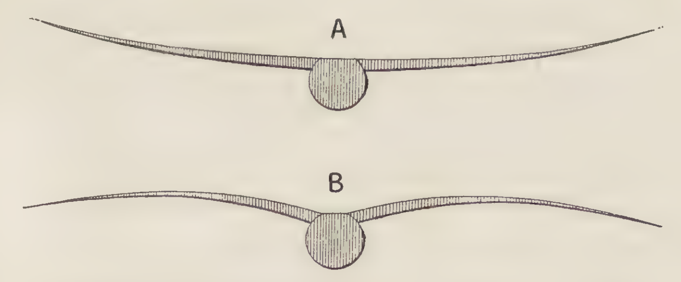


Fig. 6. — A. Courbure des ailes dans le vol à voile; — B, courbure des ailes dans le vol ramé.

laisse glisser rapidement, serre plus ou moins les ailes et offre l'aspect représenté figure 5.

Du reste, à la simple courbure que l'aile présente suivant sa longueur, il est facile de distinguer le vol à voile du vol ramé. Dans le premier (A, fig. 6), les extrémités des ailes sont relevées; dans le vol ramé, au contraire, en B, les pointes des ailes sont presque constamment dirigées vers le bas.

Ces faits ont été constatés par un grand nombre d'observateurs; mais un point qui semble leur avoir échappé, c'est l'attitude que prend la queue suivant la direction du vent.

§ 12. **Attitude de la queue.** — J'ai vu maintes fois, dans le planement circulaire du Milan, que l'oiseau change deux fois l'orientation de sa queue pendant le parcours de chacun des cercles. Ce changement se fait aux deux extrémités opposées d'un même diamètre du cercle, et la direction de ce diamètre est précisément celle du vent. Enfin, l'orientation de la queue est telle, que le vent en frappe la face inférieure, comme pour soulever la partie postérieure du corps. Ces changements de plan se font avec une rapidité fort grande.

§ 13. **Observations de Basté sur le vol à voile.** — E.-J. Basté[1] a récemment publié une série d'importants articles sur le vol à voile qu'il a étudié dans les régions tropicales sur un grand nombre d'espèces d'oiseaux : Urubu, Goéland, Naucler, Frégate, etc.

En effet, si les occasions de voir le vol à voile sont rares en Europe, elles sont très fréquentes au contraire sur les espèces d'oiseaux exotiques et dans les pays où l'air, calme dans les régions inférieures, n'est agité que dans les couches élevées. Les Aigles et les Vautours planent à des hauteurs énormes, où ils se tiennent hors de portée de la vue, jusqu'à ce qu'une proie les fasse descendre à terre. Les oiseaux de mer planent à des hauteurs bien moindres, tournoyant autour des navires, et se jouant au milieu des tempêtes les plus violentes.

Suivons Basté dans la description qu'il donne du vol à voile des oiseaux de mer.

1. *L'Aéronaute*, nos de septembre, octobre et novembre 1887.

L'auteur distingue trois manœuvres dans le vol à voile :

1° Le planement circulaire avec entraînement dans le sens du courant aérien ;

2° Le planement sur place ;

3° Le planement elliptique sans entraînement.

§ **14. Planement circulaire avec entraînement.** — Le premier type est connu de tout le monde, c'est celui qu'emploient les rapaces voiliers de nos pays. Basté représente par la figure suivante la trajectoire de l'oiseau et la direction du vent. La partie de la courbe dans laquelle l'oiseau est entraîné vent arrière représente un parcours plus long que celle où il remonte

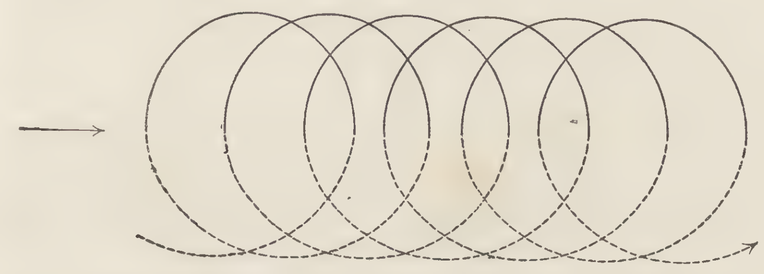


Fig. 7. — Planement circulaire avec entraînement (d'après Basté). La flèche à gauche de la figure montre la direction du vent et le sens de l'entraînement de l'oiseau. A l'extrémité droite des cercles, une pointe de flèche exprime la position de la tête de l'oiseau.

contre le vent. Dans la figure, cette dernière portion est représentée par un trait plein, tout le reste du parcours étant ponctué.

L'auteur cite neuf observations de ce genre de vol, portant sur diverses espèces : Nauclers, Urubus et Goélands. L'entraînement est de 15 à 20 mètres par seconde ; il est plus grand pour le Goéland que pour les deux autres espèces mieux douées que lui pour le vol à voile.

Dans son mouvement tournant, l'oiseau incline le corps du côté de l'intérieur du cercle qu'il décrit et dont le diamètre est de 15 à 20 mètres.

Quand, dans son planement circulaire, l'oiseau gagne de la hauteur, c'est surtout pendant qu'il vole contre le vent ; quand il a vent arrière, au contraire, comme il subit un entrainement

plus rapide, le plan dans lequel il se meut est très peu incliné sur l'horizon.

§ 15. **Planement sur place.** — L'oiseau est presque toujours à une grande hauteur quand il exécute ce genre de vol; s'il paraît réellement immobile, c'est que l'observateur, placé d'ordinaire beaucoup au-dessous de lui, ne peut juger des déplacements qui se produisent dans le sens vertical et dont voici la description d'après Basté :

L'oiseau étant en M (fig. 8), le bec au vent, incline le plan

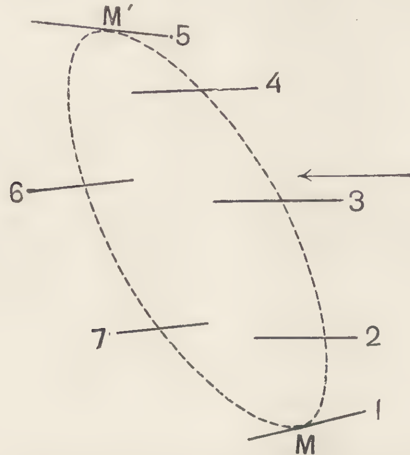


Fig. 8. — Planement sur place, vu en projection verticale (d'après Basté).

de ses ailes dans la direction représentée par la ligne 1; il est dès lors soulevé par le vent et légèrement entraîné, et arrive à la position 2, puis en 3, etc.; en 5 il change l'inclinaison du plan de ses ailes, pique dans le vent et descend en se portant en avant à la position 6, puis en 7; enfin, arrivé au bas de sa trajectoire, l'oiseau, changeant de nouveau le plan de ses ailes, recommence à monter en se laissant légèrement entraîner par le vent.

§ 16. **Planement elliptique sans entraînement.** — On a vu que, dans le premier type de vol à voile, l'oiseau ne peut pas parcourir contre le vent un espace aussi étendu que lorsqu'il est au

vent. Or, pour que l'ellipse parcourue soit fermée sur elle-même (fig. 9), il faut que les deux parcours, sous et contre le vent, soient égaux. L'oiseau emploie pour cela un artifice qui

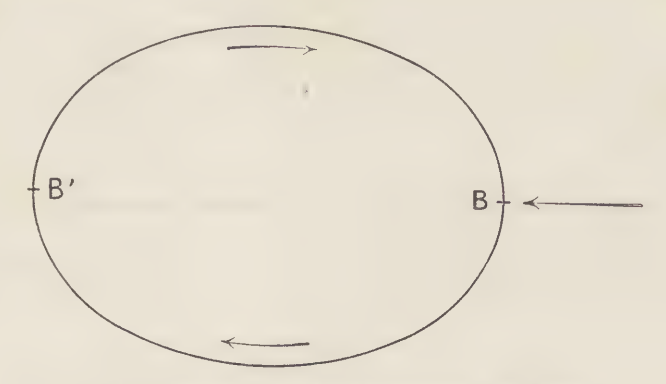


Fig. 9. — Planement elliptique sans entrainement (d'après Basté).

rappelle celui qui vient d'être décrit dans le planement sur place, il monte et descend tour à tour, éprouvant dans sa translation contre le vent une sorte de tangage que Basté représente par la figure suivante :



Fig. 10. — Tajectoire de l'oiseau remontant à voile contre le vent, mais pliant et ouvrant tour à tour les ailes (d'après Basté).

Ces oscillations ne s'observent pas dans la phase de planement sous le vent, phase qui est du reste beaucoup plus rapide. En résumé, l'oiseau qui vole à voile doit être considéré dans trois situations distinctes, suivant qu'il reçoit le vent d'avant, d'arrière ou de côté.

Le phénomène le plus étrange est assurément la progression contre le vent. On vient de voir l'espèce de tangage qui sert à

cette sorte de progression. Basté signale un autre vol pratiqué par le Naucler et dans lequel l'oiseau serre les ailes pour avancer en glissant contre le vent et en perdant de la hauteur, puis les ouvre pour reprendre son niveau primitif en reculant un peu. De ces manœuvres résulterait une trajectoire sinueuse de cette forme :



Fig. 11. — Oscillations de l'oiseau remontant à voile contre le vent (d'après Basté).

Parfois l'oiseau gagne de la hauteur par ces deux actes successifs, mais sans translation contre le vent. La figure 12 représente sa trajectoire en projection verticale.

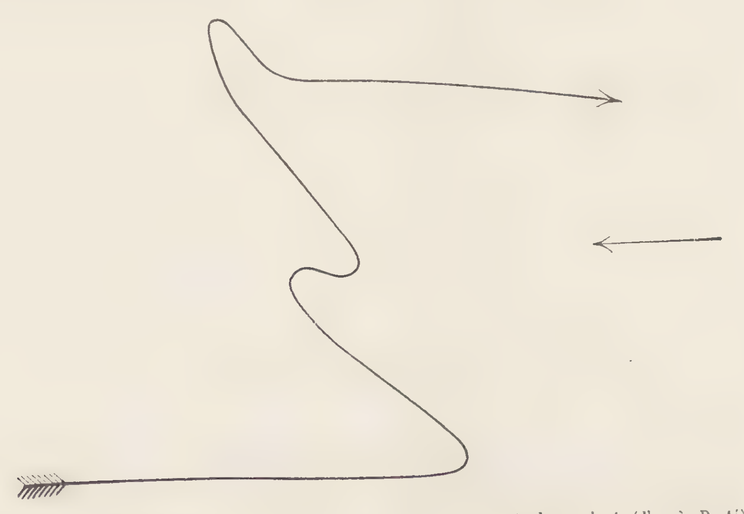


Fig. 12. — Ascension contre le vent, interrompue par des glissements descendants (d'après Basté).

Quand il a vent arrière, le voilier est rapidement entraîné et tend à perdre de la hauteur, mais, dans la vitesse même que le vent lui imprime, il trouve, d'après Basté, le moyen de remonter aisément au niveau primitif. En effet, en changeant, par un mouvement tournant, la direction de son vol, il arrive bientôt à orienter sa vitesse en sens contraire de celle du vent, ce qui

fait plus que doubler la force ascensionnelle que l'air exerce sous ses ailes[1].

Enfin, avec le vent de côté, l'oiseau glisse sur l'air en perdant peu de sa hauteur, car il reste peu de temps dans cette situation. Il incline son corps de façon que l'air agisse à la fois sur ses deux ailes.

Il n'y avait lieu pour le moment que de citer quelques-unes des descriptions de Basté. Il était intéressant de rapprocher les évolutions des oiseaux voiliers de celles des rameurs si bien décrites par Huber. Ce rapprochement montre des traits communs entre ces deux genres de vol : la transformation de la vitesse en hauteur et de la hauteur en vitesse s'observe de part d'autre. Ce qu'il y a de spécial au vol à voile, c'est l'action du vent : quand l'oiseau le reçoit de face, il en fait de la hauteur, et de cette hauteur il tire sa vitesse contre le vent, par une orientation appropriée de ses ailes.

Les études qui viennent d'être résumées ont duré de longues années; l'auteur était dans les conditions les plus favorables pour observer les diverses espèces d'oiseaux voiliers en différents climats et dans toutes sortes de conditions atmosphériques. Mais, réduit à la simple vue pour estimer l'amplitude, la direction et la vitesse des différentes évolutions du vol, il n'a pu qu'en donner une représentation approchée.

§ 17. **Observation de Bakounine.** — Malgré la grande confiance que doivent inspirer les observations de Basté, il faut cependant en signaler d'autres qui les contredisent sur certains points. Bakounine a publié, dans le journal *l'Aéronaute*, le résultat d'expéditions qu'il a entreprises dans les Carpathes pour surprendre certains détails du vol plané des Aigles. S'élevant sur le flanc des monts jusqu'à la hauteur où planent ces oiseaux, il les a vus décrire leurs orbes et a noté avec soin la direction du vent. Or, Bakounine croit avoir observé que le cercle parcouru

1. On voit que l'auteur soutient formellement l'opinion que les physiciens traitent de paradoxale; on trouvera plus tard les calculs sur lesquels il se base.

par l'oiseau n'était pas contenu dans un plan horizontal, mais que l'Aigle s'élevait quand il avait vent arrière, et s'abaissait au contraire quand il volait contre le vent. Pour Basté, on vient de le voir, l'oiseau s'élève au contraire quand il avance contre le vent.

La contradiction entre ces deux opinions s'explique par l'insuffisance des moyens d'observation. Bakounine croit s'être élevé précisément au niveau où volaient les Aigles. Mais s'il s'est trouvé quelque peu au-dessus ou au-dessous de ce niveau, la perspective a dû le tromper sur la hauteur de l'oiseau dans les deux diamètres opposés de son parcours circulaire.

§ 18. **Insuffisance de l'observation; projet d'expériences sur le vol à voile.** — Depuis longtemps convaincu de l'insuffisance de l'observation simple pour juger la véritable trajectoire que suit dans les airs un oiseau en planant, j'ai proposé une méthode qui lèverait tous les doutes, mais que je n'ai pu employer, n'ayant jamais rencontré les circonstances favorables.

Cette méthode était basée sur l'emploi de deux chambres noires, sur le verre dépoli desquelles deux observateurs suivraient en même temps le parcours de l'oiseau voilier. Depuis lors, les applications de la photographie à l'étude des mouvements ont donné des solutions bien plus parfaites dont il sera question plus loin.

CHAPITRE II

DES DIFFÉRENTS ACTES DU VOL RAMÉ

Préparation au vol; essor. — Fréquence des battements des ailes chez les différentes espèces d'oiseaux. — Flexions et extensions de l'aile, ses changements de plan, sa trajectoire. — Bruits qui accompagnent quelquefois les battements des ailes. — Amptitude des oscillations de l'aile aux divers instants du vol. — Changements de direction du vol. — Mouvements que les ailes impriment à l'air. — Influence du vent sur le vol ramé. — Influence de la raréfaction de l'air sur le vol des oiseaux. — Des différents types du vol, selon la taille des oiseaux. — Ordre suivant lequel se disposent les oiseaux quand ils volent en troupe. — Mouvements d'ensemble des oiseaux. — Vitesse du vol. — Étendue que peuvent parcourir certains oiseaux.

Si, dans la plupart des cas, l'œil peut suivre les grandes évolutions de l'oiseau qui vole à rame ou à voile, c'est en revanche avec beaucoup de difficulté qu'il apprécie les actes mécaniques du vol, les mouvements des ailes et les changements d'attitude du corps. Cependant l'observation a fourni sur ce point des notions assez intéressantes pour qu'il soit nécessaire de les indiquer sommairement. Si imparfaites que soient ces premières connaissances, elles sont la préparation naturelle à des études plus précises.

On trouvera dans ce chapitre l'exposé sommaire de ce que l'œil peut découvrir dans les actes mécaniques du vol.

§ **19. Préparation au vol. Essor.** — Pline l'Ancien, avons-nous dit, observa que les oiseaux, avant de s'envoler, cherchent toujours à acquérir une vitesse préalable, soit en sautant, soit en courant ou en se laissant tomber d'un lieu élevé. Les observateurs modernes ont confirmé ces remarques en les appuyant de nombreux exemples dont quelques-uns méritent d'être relatés.

Le saut qui précède l'essor s'observe chez les espèces dont le départ est brusque : les Gallinacés, Perdreaux et Cailles tapis au creux d'un sillon s'élancent tout d'un coup par une brusque détente qui les met instantanément en état de battre des ailes. Sur des oiseaux démontés par un coup de fusil et qui cherchent vainement à s'envoler, on a souvent l'occasion d'observer la hauteur de ces sauts. Mouillard a vu un Corbeau privé d'ailes qui faisait des bonds de près d'un mètre de hauteur; d'Esterno raconte qu'un Balbuzard démonté sautait à 70 centimètres de hauteur. Les Passereaux ont les jambes très fortes et sautent aussi très haut quand ils s'envolent de terre.

Une course précède l'essor chez les Échassiers, Grues et Cigognes, qui font d'abord de grandes enjambées, puis des sauts successifs de plus en plus étendus, dans lesquels ils s'aident du battement de leurs ailes ; ils quittent enfin le sol et s'élèvent. Les Vautours et les Aigles, quand ils vont s'enlever de terre, courent longuement les ailes déployées.

Ainsi Wenham[1], dans un voyage en Égypte, aperçut un Aigle posé au milieu d'une plaine de sable. L'oiseau se sentant surpris ouvrit en partie ses ailes et s'éloigna d'un pas rapide. Un coup de feu transforma sa marche en une course dont il accroissait la vitesse par de longs battements d'ailes; il quitta enfin la terre en s'élevant suivant une pente faiblement inclinée, jusqu'à une grande hauteur, en regagnant son aire dans la direction de la chaîne libyque située à 5 milles environ.

Quelques fragments de plumes restés sur le sol permirent au chasseur de reconnaître la place où l'Aigle avait reçu le coup de fusil. A partir de cet endroit, sur une grande longueur, les empreintes des serres se voyaient sur le sol; d'abord fortement appuyées, ces traces se transformaient graduellement en larges égratignures, à mesure que l'oiseau, par ses battements d'ailes, avait allégé son poids et accru sa vitesse. L'étendue sur laquelle on voyait ces empreintes était de $18^m,28$. Ainsi, malgré l'action

1. Wenham, *Rapport annuel de la Société aéronautique de la Grande-Bretagne*, pour l'année 1866.

stimulante d'un coup de feu, l'Aigle avait dû courir longtemps avant de pouvoir quitter le sol.

Un oiseau qui a les ailes longues et les pattes courtes s'envole à grand'peine de terre, car, ne pouvant se détacher du sol par un saut vigoureux, il n'a pas le libre mouvement de ses ailes. Le Martinet, l'Albatros, le Condor, présentent cette conformation. Bien souvent les matelots, après avoir pris à l'hameçon un Albatros qui planait le long du navire, le placent sur le pont et s'amusent de son impuissance à prendre son essor. Le Martinet déposé à terre a beaucoup de peine à s'envoler. Enfin, lorsqu'on veut capturer un Condor, le moyen habituel consiste à placer la proie qui doit l'attirer dans une enceinte étroite fermée par une palissade ; dans cet espace restreint, le Condor reste prisonnier.

La plupart des oiseaux de ce type ne se reposent que sur des lieux élevés d'où ils puissent s'élancer avant de prendre leur essor ; ils glissent alors sur l'air, les ailes étendues, puis, suivant la force du vent, volent à rames ou à voiles. Enfin, certains oiseaux aquatiques essentiellement rameurs s'enlèvent, de la terre aussi bien que de l'eau, sans aucune des préparations que nous venons de décrire ; leurs ailes, du reste, sont courtes et il suffit à l'oiseau de se dresser, la tête haute, pour qu'elles aient leurs libres mouvements. Le Canard monte ainsi verticalement d'abord ; s'il s'envole du milieu d'un bois, il s'élève en ligne droite à 10 ou 15 mètres, jusqu'à la cime des arbres, puis prend son essor véritable et se dirige horizontalement (Audubon).

Sauf ces exceptions, les oiseaux cherchent de diverses façons à acquérir de la vitesse avant de battre des ailes. Cette vitesse, on le verra, facilite grandement le vol, en fournissant à l'aile un appui plus solide sur l'air.

§ 20. Fréquence des battements des ailes chez les différentes espèces d'oiseaux. — Les observateurs ont souvent cherché à

1. D'après le duc d'Argyll, le Colibri, lorsqu'il vole sur place, tient la queue ouverte en éventail et le corps presque vertical ; quant à ses ailes, on ne les aperçoit que sous une apparence nuageuse et très vague, à cause de la vitesse de leurs mouvements (*L'Aéronaute*, avril 1869).

mesurer cette fréquence au moyen du chronomètre, en comptant les battements pendant une période de temps aussi longue que possible. Mais ces mesures sont difficiles et ne s'appliquent guère qu'aux espèces de grande taille, qui donnent des battements peu fréquents; chez les petits oiseaux, les coups d'ailes ne peuvent se compter, et chez le plus petit de tous, le Colibri, ils sont tellement rapides que les ailes sont, dit-on, invisibles dans leur frémissement continu, quand il vole sur place en plongeant le bec dans le calice d'une fleur.

Voici, d'après certains auteurs, la fréquence moyenne des battements des ailes chez quelques espèces :

Cigogne..................	1 $^{3}/_{4}$	battements à la seconde[1].	
Naucler..................	3 $^{1}/_{4}$	—	—
Kamichi..................	1 $^{1}/_{2}$	—	—
Urubu..................	2 $^{8}/_{10}$	—	—
Goéland..................	3 $^{1}/_{2}$	—	—
Mouette..................	5 $^{1}/_{2}$	—	—
Pélican..................	1 $^{1}/_{6}$	soit 70 par minute[2].	
Pigeon..................	10		

Du reste, dans chaque espèce, la fréquence des battements d'ailes varie sous maintes influences; elle s'accroît dans le vol ascendant et surtout dans le vol sur place, mais diminue dans le vol descendant; souvent même l'oiseau suspend totalement ses coups d'ailes, quand sa translation est assez rapide. Il accélère au contraire le battement de ses ailes, quand il veut hâter sa fuite ou quand il emporte un corps pesant. Si la surface des ailes est diminuée, la fréquence des battements s'accroît; Mouillard l'a observé sur des Pigeons auxquels il rognait les rémiges pour rendre leurs ailes plus étroites.

§ 21. **Flexion et extension de l'aile, ses changements de plan, sa trajectoire.** — Chez les espèces à ailes courtes, et dans es premiers instants du vol, on observe des mouvements très

1. Basté, *L'Aéronaute*, nov. 1887.
2. Wenham, *Rapport annuel de la Société aéronautique de la Grande-Bretagne*, pour l'année 1885.

compliqués dans lesquels semblent se produire une flexion et une extension de l'aile à chaque battement. Peu à peu l'aile tend à rester en extension permanente et, dans le plein vol, à se mouvoir tout d'une pièce. Toutefois, chez certaines espèces, l'extrémité de l'aile semble exécuter des mouvements isolés. Cela s'observe dans le vol ascendant de l'Alouette et dans le vol sur place des oiseaux de proie.

Quand on observe d'en bas un Corbeau ou un Pigeon qui passe à une grande hauteur, les élévations et les abaissements des ailes ne sont plus visibles; en revanche, les ailes montrent nettement des mouvements d'avant en arrière et d'arrière en avant.

Il est bien difficile de savoir quel rapport ces mouvements d'avant en arrière affectent avec ceux qui se font de haut en bas. Toutefois, sous certaines incidences et surtout dans le vol sur place, la pointe de l'aile paraît décrire une ellipse allongée, sur l'orientation de laquelle les observateurs sont en désaccord. D'Esterno prétend que cet axe est oblique en bas et en arrière, Straus-Durckeim le croit dirigé en bas et en avant. On trouvera plus loin les expériences destinées à déterminer cette trajectoire.

Suivant qu'elle monte ou qu'elle descend, l'aile s'incline différemment; on peut s'en assurer sur les oiseaux de grande taille, quand on se trouve dans des conditions favorables que nous allons indiquer.

Dans les grands ports où les Goélands jouent par centaines et où ces oiseaux, familiarisés avec la présence de l'homme, volent à quelques mètres à peine du pont des navires, on peut choisir à son gré les sujets favorables à l'observation. Les variétés de teinte du plumage, les incidences de la lumière, la direction du vol, tout peut être mis à profit. Or, si l'on observe un de ces oiseaux volant à une faible hauteur et fuyant en ligne directe, on voit son aile prendre tour à tour deux apparences différentes : elle est, pour ainsi dire, tour à tour visible ou invisible.

Avec plus d'attention, on constate que dans les moments où l'aile est presque invisible, cela tient à ce qu'elle se présente

suivant sa tranche, tandis que dans les moments où elle devient visible, elle semble très épaissie dans sa moitié externe c'est-à-dire au voisinage de sa pointe. Cet épaississement est produit par une torsion qui oriente légèrement en arrière la face inférieure du bout de l'aile. Le doute n'est pas possible à cet égard quand le soleil, vers l'heure de midi, éclaire vivement la face supérieure de l'aile, car c'est la face obscure, l'inférieure par conséquent, qui apparaît d'une manière intermittente.

Si l'on cherche ensuite à saisir la relation de ces changements du plan de l'aile avec des mouvements verticaux, il est très facile de voir que la torsion se produit au moment où l'aile s'abaisse.



Fig. 13. — Torsion de l'aile descendante par la résistance de l'air.

La contre-épreuve de cette expérience est facile à faire. Qu'on se place sur un lieu plus élevé et qu'on choisisse pour l'observation un oiseau très blanc de plumage et vivement éclairé. Si cet oiseau vole en fuyant dans un plan situé plus bas que l'observateur, il se produit un phénomène inverse de celui qu'on voyait tout à l'heure. L'éclat de l'aile, très vif pendant la période de remontée, s'éclipse au voisinage de son extrémité pendant l'abaissement; car le bout de l'aile, en se retournant, ne représente plus que sa tranche.

§ 22. **Bruits qui accompagnent quelquefois les mouvements des ailes.** — Certaines espèces d'oiseaux ont le vol absolument silencieux; le Grand-Duc, la Chouette et l'Engoulevent sont de ce nombre. Le vol est bruyant au départ chez les Gallinacés. Les premiers coups d'ailes du Pigeon s'accompagnent d'un claquement que Virgile a comparé à l'entre-choquement des deux mains qui applaudissent.

....Plausum exterrita pennis
Dat tecto ingentem...

(*Énéide*, l. VI, vers 215.)

Et plus loin :

....Alis
Plaudentem nigro figit sub nube columbam
(*Énéide*, l. V, vers 517.)

C'est bien, comme d'Esterno l'a observé, la percussion des ailes, l'une contre l'autre, qui donne lieu au claquement dont l'essor du Pigeon s'accompagne, et ce bruit n'a lieu que dans les premiers coups d'ailes. J'ai constaté ces faits dans les conditions suivantes.

§ 23. **Amplitude des oscillations de l'aile aux différents instants du vol.** — Sur la place Saint-Marc, à Venise, où les Pigeons familiers viennent, par centaines, picorer le grain qu'on leur jette, j'ai observé pendant de longues heures les différentes évolutions de ces oiseaux. Il est facile de surprendre l'entre-choquement sonore des ailes au moment de l'essor.

Quand un Pigeon s'envole en fuyant, on voit que l'excursion des battements de ses ailes change continuellement, entre l'instant du départ et celui du plein vol, puis entre le plein vol et le moment où l'oiseau va de nouveau se poser à terre.

La figure 14 montre ce qui se passe dans ces trois phases successives. Au moment de l'essor, les ailes s'entrechoquent au som-

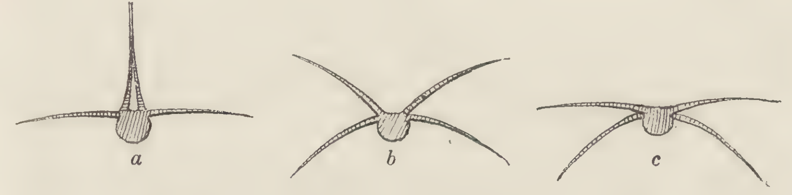


Fig. 14. — Des différentes orientations de l'angle d'oscillation des ailes d'un pigeon à l'essor *a*, en plein vol *b* et à la fin du vol *c*.

met de leur course (en *a*), tandis que dans le bas de leur excursion, elles atteignent à peine la position horizontale : l'angle formé par ces deux positions extrêmes est d'environ 90 degrés. Un instant plus tard, l'oiseau est en plein vol ; ses ailes (en *b*) oscillent autour de la position horizontale, formant un angle de 80 degrés à peine. Plus tard enfin (en *c*), quand l'oiseau se rapproche du

sol, ses ailes ne s'élèvent plus guère qu'à la position horizontale, mais, dans leur abaissement, descendent de plus en plus, jusqu'au moment où l'aile effectuera ses battements d'arrêt.

Dans le plein vol toutefois, l'aile du Pigeon n'est pas silencieuse; elle imite à peu près le bruit d'une cravache qui cingle l'air. Certains oiseaux, lancés à grande vitesse, font, paraît-il, un bruit strident. Audubon affirme que dans le vol du Pigeon voyageur ce bruit s'entend à 50 ou 60 pas; le Cygne trompette fait entendre, dit-il, un cliquetis produit par le mouvement des plumes. Dans le vol de l'Aigle à tête blanche, ce cliquetis prendrait l'intensité d'une violente rafale qui passerait dans les arbres.

La cause de ces bruits est encore mal définie. Mouillard l'attribue à l'entrechoquement des tuyaux ou canons des plumes; il fait observer, à l'appui de cette supposition, que chez les oiseaux à vol silencieux, ces tuyaux sont matelassés d'un épais duvet

§ **24. Changement de direction du vol.** — Léonard de Vinci, dans les fragments de ses manuscrits qui nous sont conservés, donne la description suivante des actes par lesquels l'oiseau change la direction de son vol :

« L'oiseau qui descend, vent debout ou vent arrière, tient les ailes serrées pour n'être ni soutenu ni empêché par l'air; il les maintient avec force relevées au-dessus de son corps afin que la force d'impulsion ne les fasse pas renverser.

« S'il tient les humérus serrés et la pointe des ailes étalée, c'est afin de diminuer sa vitesse sans dévier de sa ligne de direction. S'il ouvre les humérus plus que la pointe des ailes, c'est pour retarder son mouvement avec plus de puissance. Enfin, s'il rapproche également du corps les humérus et les extrémités des ailes, c'est qu'il veut que sa descente n'éprouve aucune résistance de la part de l'air. Quand il bat des ailes *en arrière* (*sic*) pendant la descente, c'est afin de l'accélérer.

« Pour tourner en descendant, l'oiseau serre une de ses ailes et étend l'autre; il tourne alors autour de l'aile reployée.

« En plein vol, les changements de direction s'obtiennent de même; l'aile la plus étendue donne des battements plus amples,

de sorte que la moitié correspondante du corps progresse plus vite que l'autre. Il en résulte une rotation autour de l'aile serrée. »

Pour Léonard de Vinci, un simple déplacement du centre de gravité de l'oiseau suffit pour produire un changement dans la direction du vol ; s'il porte la tête à droite, par exemple, c'est sur la droite qu'il déviera. D'Esterno et les observateurs modernes ont confirmé de tous points ces remarques.

Enfin l'oiseau qui veut monter oriente l'axe de son corps dans une direction plus ou moins rapprochée de la verticale et bat des ailes avec rapidité, en frappant l'air latéralement. Mais ces mouvements sont trop précipités pour que l'œil puisse les suivre ; des expériences appropriées nous en donneront l'analyse.

§ 25. **Arrêt du vol.** — L'oiseau qui veut s'arrêter doit d'abord maîtriser sa vitesse, pour ne pas se briser contre le sol. Quelques Rapaces, dit-on, se fiant sans doute à la puissance de leurs serres, s'arrêtent en plein vol en étreignant vigoureusement la branche sur laquelle ils se posent. Il ne m'a pas été donné d'observer ce genre d'arrêt soudain.

Pour modérer et même pour éteindre sa vitesse, l'oiseau emploie différents moyens : le plus habituel consiste en un genre spécial de battements où le plan de l'aile, verticalement orienté, frappe l'air dans le sens horizontal, le corps est alors incliné obliquement, la tête haute et les jambes pendantes.

D'autres fois l'oiseau, volant à une grande hauteur au-dessus du lieu où il veut s'arrêter, cesse de ramer, ouvre largement les ailes, déploie la queue et porté sur ces trois points d'appui comme sur un parachute, descend, d'un mouvement ralenti, jusqu'au voisinage du sol ; au moment d'atterrir, il exécute les battements d'arrêt.

Mouillard a vu certains grands oiseaux chercher, pour s'arrêter, une pente ascendante et rapide contre laquelle ils courent en montant, éteignant leur vitesse comme un cerceau qui roule contre une pente.

Les Échassiers emploient, pour se poser, mille précautions que

leur commande la fragilité de leurs longues jambes. Ils tournent longtemps au-dessus du sol, s'en approchant peu à peu; puis, les ailes à demi fermées, allongent les pieds et font quelques pas en courant pour amortir la violence du choc.

Quant aux oiseaux plongeurs, Cygnes, Oies et Canards, ils peuvent impunément s'abattre en pleine vitesse sur l'eau, qu'ils éclaboussent avec un grand tapage.

§ 26. **Mouvements que les ailes impriment à l'air.** — Un Pigeon qui s'envole de terre pour s'élever presque verticalement sur un toit, produit à la surface du sol un fort courant d'air : les pailles, les poussières, les menus objets sont chassés autour de lui sur un espace de 1 mètre et même plus. Dans les jardins zoologiques, lorsque les Aigles ou les Vautours sautent du sol sur leurs perchoirs en battant des ailes, un vent violent remue le sable de leurs cages. Mais dans le vol horizontal il n'en est plus ainsi; l'Hirondelle effleure l'eau sans en rider la surface, et les plus grandes espèces d'oiseaux se comportent de la même façon.

Wenham, dont les observations sont empreintes de tant de sagacité, raconte que, dans les soirées calmes, il voyait souvent des Pélicans, disposés en longues files régulières, descendre le cours du Nil avec une vitesse qu'il estime à 50 kilomètres à l'heure. Ces oiseaux glissaient à 30 ou 40 centimètres à peine au-dessus du fleuve, sans produire la moindre agitation de la surface de l'eau. Ces observations tendent à prouver que l'air frappé par les ailes s'échappe en arrière, suivant l'axe du corps de l'oiseau.

§ 27. **Influence du vent sur le vol ramé.** — Un vent modéré est favorable à l'essor des oiseaux, car tous, au moment où ils s'envolent, se tournent le bec au vent. Ce fait est très bien établi; on en verra plus tard la théorie : celle-ci montre que le vent qui souffle en sens contraire de la translation de l'oiseau fournit à son aile un appui plus solide que l'air calme. C'est en créant un *vent relatif* que la vitesse de translation de l'oiseau lui rend le vol plus facile.

En l'absence de tout vent, l'essor est très difficile. Les chasseurs savent que par un temps calme la Perdrix *tient*, c'est-à-dire ne s'envole que lorsqu'on est arrivé très près d'elle. Elle hésite à partir, sachant l'effort qu'il lui en coûtera, effort qu'attestent les cris dont s'accompagnent ses premiers coups d'ailes. Par un vent même léger, les Perdrix s'envolent de plus loin et avec moins de hâte, presque toujours sans faire entendre d'autre bruit que celui de leurs ailes.

Les oiseaux de proie qui volent sur place se tiennent aussi le bec au vent; enfin, c'est encore le bec au vent que les oiseaux se posent à la fin de leur vol; Mouillard a vu de jeunes Pigeons inexpérimentés se faire rouler par le vent, pour s'être mal orientés au moment d'atterrir.

Plus le vent est fort, plus la nécessité de cette orientation est impérieuse. Par un vent violent qui soufflait parallèlement au mur d'un pigeonnier, j'ai vu les oiseaux, pour descendre à terre, exécuter un vol de côté qui leur était imposé par l'obligation de recevoir le vent de face. Sur un très grand nombre de Pigeons, pas un seul ne manqua d'exécuter cette singulière manœuvre.

Mais quand l'oiseau a pris son essor, il peut changer de direction et recevoir le vent en arrière. Les Cailles recherchent, dit-on, le vent arrière pour leurs migrations; les Pigeons voyageurs en tirent profit et gagnent de la vitesse.

Huber a noté une différence notable dans la vitesse du Faucon suivant que l'oiseau remonte le vent ou descend avec lui. Il semble qu'à cet égard les diverses espèces se comportent différemment et qu'un certain nombre d'entre elles évitent de voler avec le vent arrière.

Enfin le vent, quand il souffle avec une grande force, fait changer le type du vol de certains oiseaux qui, naturellement rameurs, prennent alors le vol à voile. Les Goélands, par exemple, rament continuellement quand l'air est calme, et volent à voile par les grands vents.

§ 28. Influence de la raréfaction de l'air sur le vol des oiseaux.

— Les aéronautes ont quelquefois emporté des oiseaux dans leurs nacelles, pour les lâcher quand ils seraient arrivés à une certaine hauteur ; les relations de ces expériences sont malheureusement trop rares. Biot et Gay-Lussac lâchèrent des Pigeons voyageurs d'une hauteur de 6 000 mètres et les virent tomber d'une vitesse accélérée : l'air trop rare ne pouvait, paraît-il, leur permettre de voler. Crocé-Spinelli et Sivel en lâchèrent d'une hauteur de 5 000 mètres ; ces oiseaux descendirent en décrivant de grands cercles d'environ 200 à 300 mètres de diamètre et avec une vitesse que les aéronautes estimaient à plus de 40 mètres par seconde. Ainsi abandonnés hors de vue de la terre, les Pigeons sont incapables de s'orienter et de retrouver leur colombier ; c'est là sans doute ce qui a empêché de renouveler ces intéressantes observations.

§ 29. **Des différents types que présente le vol suivant la taille des oiseaux.** — Les petits oiseaux ont presque tous un vol saccadé ; quelques-uns, après une série de coups rapides, plient les ailes, se laissent glisser un moment sur l'air, puis recommencent leurs battements. D'après d'Esterno, si l'on excepte la Tourterelle, les espèces qui atteignent le poids de 300 grammes ne pratiquent pas le *vol plié* propre aux oiseaux de petite taille. Elles procèdent au contraire par battements d'ailes continus, rarement interrompus par des planements de courte durée ; dans le vol descendant toutefois, ces planements sont plus prolongés. Le vol à voile n'appartient qu'aux grandes espèces : l'Hirondelle et le Martinet ne le soutiennent que peu d'instants, mais le Condor, la Frégate, les Pélicans, les Vautours, planent pendant des heures entières sans donner un coup d'aile.

Les oiseaux les plus grands qui vivent de nos jours, l'Autruche, le Casoar, le Nandou, ne volent pas. Les naturalistes pensent que les grandes espèces disparues, le Dronte, l'Épiornis, le Dinornis, ne volaient pas non plus. On en a conclu, un peu légèrement peut-être, qu'au delà d'une certaine taille, les oiseaux sont incapables de voler. Mais d'après Mouillard le grand Ptérodactyle de Greensand avait 9 mètres d'envergure, son poids devait

atteindre 116 kilogrammes; tout porte à croire que cet animal gigantesque était apte à voler.

§ 30. **Ordre suivant lequel se disposent les oiseaux quand ils volent par bandes.** — Les grands oiseaux aquatiques, Oies, Cygnes, Grues, Flamants, Pélicans, se placent sur deux files convergentes en forme d'un V, qui progresse par sa pointe. Les Canards, Barges et petits Échassiers volent plus souvent sur une seule ligne. Les Eiders rasent la mer, et leur longue file ondule en suivant la forme des vagues qu'elle effleure.

Quelle que soit la forme qu'elle affecte, une bande d'oiseaux semble dirigée par un chef qui se place à l'avant. Audubon affirme que les vieux mâles volent en tête, puis les femelles et enfin les jeunes. « Quand le chef est fatigué, dit-il, il change de position dans les rangs et un autre vient prendre sa place, qui vient à son tour fendre l'air au-devant de la colonne. » On observe enfin que chaque particularité qui survient dans le vol du chef est répétée de proche en proche sur toute la file des oiseaux.

D'Esterno a vivement combattu cette interprétation généralement admise avant lui, et prétend que, dans les migrations des Canards, l'ordre dans lequel ces oiseaux se disposent varie suivant la direction du vent par rapport à l'axe du vol. « Dans tous les cas, dit-il, l'ordre dans lequel volent les Canards est réglé de telle sorte que chacun d'eux se trouve en dehors du sillage de ceux qui le précèdent. » Pour expliquer le soin que chaque oiseau met à éviter le sillage de ceux qui sont devant lui, d'Esterno admet que l'air agité par des battements d'ailes fournit moins d'appui qu'un air calme[1].

1. Pour d'Esterno, si une bande de Canards est disposée en forme de V dont la pointe soit directement opposée au vent, cet arrangement suffit pour empêcher qu'un oiseau passe dans le sillage d'un autre. Mais si les oiseaux volant dans cet ordre recevaient le vent par le travers, la branche sous le vent pourrait se trouver dans le sillage de celle qui est au vent.

Or, quatre dispositions différentes permettent d'échapper à cet inconvénient. Dans l'une, les Canards superposent les branches du V dans un plan vertical, ou tout au moins les deux branches sortent du plan du vent.

Dans un autre arrangement représenté en 1 (fig.15), le sillage des Canards de

Mais l'exactitude de cette théorie est bien difficile à prouver. On apprécie mal, d'en bas, le plan dans lequel sont placées les deux branches d'un vol d'oiseaux. En outre, on ne peut guère être sûr de l'angle que forme la direction du vent avec celle du vol, car les couches atmosphériques sont le siège des courants de sens divers, comme le montre souvent le désaccord des girouettes avec le mouvement des nuages.

la branche située au vent passe entre ceux qui font partie de la branche d'aval.

D'autres fois, comme en 2, la branche d'aval est tellement éloignée de l'autre, que le sillage s'éteint avant de lui arriver.



Fig. 15. — Des diverses positions que peuvent prendre les canards dans le plan du vent pour qu'aucun des oiseaux ne se trouve dans le sillage d'un autre. Les flèches indiquent la direction du vent.

Enfin, en 3, les Canards peuvent se mettre sur une seule ligne que le vent frappe de côté. (D'Esterno, *Du vol des oiseaux*, 2e édition, p. 87. Paris, Librairie Nouvelle, 1865.)

§ 31. **Mouvements d'ensemble des oiseaux.** — La tendance de certains oiseaux à voler en bandes compactes porte à croire que, loin de se gêner réciproquement, ils s'entr'aident parfois en se groupant. Mouillard croit avoir observé qu'une bande d'Étourneaux vole plus vite qu'un Étourneau isolé.

Dans le vol en troupe, l'imitation des mouvements du premier oiseau par la série de ceux qui le suivent n'est peut-être pas l'effet d'un ordre émané du chef et exécuté sur toute la ligne. Il résulte peut-être d'une influence extérieure, qui agirait en un lieu donné sur tous les oiseaux qui y passent successivement. Le moindre courant d'air localisé semble, en effet, capable de changer subitement le caractère du vol. Ainsi voit-on, le long des falaises de la mer, tous les Goélands voler à la voile, sauf en un lieu abrité du vent, qu'ils ne traversent qu'en faisant du vol ramé.

D'autres fois, d'après Mouillard, on aperçoit sur une vaste plaine un grand nombre de Milans orientés le bec contre le vent et volant sur place. A un instant donné, comme par l'effet d'un signal, tous ensemble se mettent à planer, en décrivant des courbes : c'est le coup de vent qui, en faiblissant, a forcé les oiseaux à changer le type de leur vol.

Parfois, l'ensemble des mouvements d'une bande d'oiseaux est plus surprenant encore. Un vol de Vanneaux paraît tour à tour blanc et noir, suivant que le battement des ailes sombres cache ou démasque les ventres blancs.

Chacun a été frappé de l'ensemble étonnant avec lequel se fait l'essor d'une compagnie de Perdrix grises.

Souvent on voit une bande d'Étourneaux s'étaler en une nappe dont le plan s'élève ou s'abaisse, s'incliner diversement comme sous une volonté commune, s'allonger en un ruban immense, puis se rassembler encore, raser le sol, se relever et tournoyer longtemps avant de se reposer sur la prairie.

§ 32. **Vitesse du vol.** — Très variable pour les différents oiseaux, la vitesse du vol n'a été exactement mesurée que pour les Pigeons voyageurs, à cause de la facilité particulière qu'on a de noter l'heure du lâcher et celle de l'arrivée au colombier. Il

paraît démontré en outre que les Pigeons voyageurs ne prennent pas de nourriture, même pendant des trajets fort longs; de sorte que leur moyenne vitesse se déduit exactement du temps qu'ils ont employé à franchir une distance connue.

Un célèbre colombophile, M. Van Roosebecke, assigne comme vitesse maximum au vol des Pigeons voyageurs, 20 à 25 lieues à l'heure (la lieue belge étant de 5 kilomètres). Wilker cite un Pigeon qui a parcouru 30 kilomètres en 20 minutes. La distance de 398 kilomètres qui sépare Spa de Paris est franchie par les Pigeons en 5 heures environ, ce qui fait 80 kilomètres à l'heure.

Lorsqu'on estime la vitesse de l'oiseau en mètres par seconde, les observations qui précèdent donnent 36 mètres, 26 mètres et 25 mètres à la seconde.

Pour les autres oiseaux, la vitesse est moins bien connue[1]; voici des chiffres empruntés à Jackson :

Caille	17	mètres	par seconde.
Pigeon	27	—	—
Faucon	28	—	—
Aigle	31	—	—
Hirondelle	67	—	—
Martinet	88	—	—

Liais[2] et Mouillard indiquent un procédé qui leur a réussi pour mesurer la vitesse de certains oiseaux. Comme on manque de

1. On est souvent réduit à des conjectures pour estimer la vitesse du vol de certains oiseaux.

La Frégate ne vole pas la nuit et ne dort pas sur la mer; or les navigateurs en observent souvent à 300 ou 400 lieues des côtes; il faut donc que cet oiseau soit capable de faire au moins 600 lieues en un jour : 300 pour gagner le large et 300 pour revenir à terre.

Audubon a estimé la vitesse de certains Pigeons d'après la nature des substances qu'il trouvait dans leur jabot. Du riz qui, d'après l'état de la digestion, devait avoir été mangé depuis environ 6 heures et que les Pigeons n'avaient pu trouver que dans la Caroline distante de 300 à 400 milles, lui fit admettre que les oiseaux avaient parcouru environ 1 mille à la minute (soit 30 mètres par seconde).

D'après le même auteur, le Canard Eider franchirait, en une heure, environ 40 milles, soit 40 mètres par seconde; le Canard sauvage 45 mètres.

2. C. R. de l'Acad. des Sc., t. LIX, p. 907, 1864.

point de repère pour évaluer les déplacements d'un oiseau dans l'espace, c'est son ombre qu'il faut chercher à voir, et quand cette ombre se projette au voisinage de l'observateur, celui-ci peut se rendre compte de la rapidité de son mouvement grâce aux repères pris sur le sol.

Enfin, les voyages en chemin de fer donnent parfois l'occasion d'apprécier la vitesse du vol des oiseaux, quand ceux-ci vont parallèlement à la marche du train et dans le même sens.

On voit alors que les Passereaux sont fortement distancés par les trains express, dont la marche normale est de 18 mètres par seconde ; les Corneilles aussi ont une vitesse inférieure à celle des wagons. Mais les Pigeons les accompagnent et les dépassent fréquemment; les Hirondelles volent encore plus vite; quant aux Martinets, ils dépassent facilement les trains les plus rapides.

Ce qui diminue l'intérêt des mesures que nous venons de citer, c'est que diverses influences changent énormément la vitesse du vol chez les oiseaux rameurs.

Le vent est de ce nombre : d'après Van Roosebecque, les Pigeons voyageurs, par un vent debout soufflant avec force, ne feraient pas plus de 5 kilomètres à l'heure, au lieu de 25 ou 30 qu'ils font par un temps calme.

La pesanteur intervient également pour modifier la rapidité du vol : si l'oiseau s'élève, sa vitesse diminue; s'il descend, elle s'accroît.

§ 33. **Étendue que parcourent certains oiseaux en volant.** — C'est encore sur les Pigeons qu'on a le mieux déterminé la longueur du trajet parcouru d'une traite. Aldrovande rapporte qu'un de ces oiseaux alla d'Alep à Babylone, soit un parcours de 625 kilomètres, en 48 heures, et sans voyager la nuit.

Un célèbre Pigeon, nommé Gladiateur, fit en un jour le trajet de Toulouse à Versailles (530 kilomètres).

Un Faucon de Henri II, égaré à la chasse dans la forêt de Fontainebleau, fut retrouvé le surlendemain dans l'île de Malte. Il avait donc parcouru dans cet intervalle de temps 1 400 kilomètres.

Rien de plus variable, du reste, que l'étendue du vol de l'oiseau suivant les circonstances. Certains Passereaux, dont le vol est généralement peu étendu, traversent les mers en volant par grandes bandes à des hauteurs considérables et hors de portée de la vue. La Caille, qu'on ne voit guère voler à plus de 300 mètres lorsqu'elle réside chez nous, effectue des parcours fort étendus au moment de ses migrations.

Cet exposé sommaire suffit pour montrer que l'observation des oiseaux ne peut donner que des notions fort incomplètes sur le mécanisme du vol; les points sur lesquels les différents auteurs s'accordent sont en petit nombre. Or, quand une question est controversée, c'est que personne encore ne l'a abordée avec des méthodes suffisamment précises et capables de montrer la vérité avec le degré de clarté nécessaire. Les mêmes discussions se sont produites relativement à d'autres problèmes de la locomotion animale, tels que les allures du Cheval, les mouvements de la marche de l'homme, ceux de la course et du saut. Les méthodes précises qui ont résolu ces problèmes ne seront pas moins puissantes pour analyser les actes mécaniques du vol.

Il était toutefois nécessaire d'exposer les résultats fournis par l'observation; l'expérience, en effet, n'intervient qu'à son heure, lorsque les questions sont déjà posées et lorsqu'on voit clairement la direction à suivre dans les recherches.

Une autre préparation est nécessaire avant d'aborder l'analyse expérimentale des mouvements de l'oiseau : il faut faire connaissance avec l'anatomie et la physiologie des organes du vol. Ce sera l'objet des chapitres prochains.

CHAPITRE III

NOTIONS SOMMAIRES DE ZOOLOGIE ET D'ANATOMIE COMPARÉE

Importance de la zoologie et de l'anatomie comparée, pour éclairer la physiologie du vol des oiseaux. — La zoologie rapproche les oiseaux des reptiles : caractères communs à ces deux classes d'animaux : structure des membres antérieurs; Archéoptéryx et Crocodile; ressemblance des embryons des reptiles et des oiseaux; analogies des membres antérieurs dans la Tortue de mer et le Pingouin; analogies fonctionnelles. — Homologie de l'aile d'un oiseau et du bras d'un homme : squelette; variabilité des longueurs relatives des différents rayons osseux de l'aile. — Cavités aériennes des os. — Articulations de l'aile, solidarité de leurs mouvements. — Muscles de l'aile, leur homologie avec ceux d'un bras; développement énorme du grand pectoral; importance fonctionnelle de ce muscle. — Des membranes alaires.

Celui qui, pour la première fois, voit une locomotive passer à toute vapeur, doit se faire des idées étranges sur la fonction de cette machine. Mais s'il lui est permis de la voir arrêtée, de l'examiner sous toutes ses faces, d'en démonter les pièces; mieux encore, s'il peut la comparer à d'autres machines analogues qu'il connaisse déjà, cet examen et cette comparaison lui seront extrêmement utiles pour comprendre la fonction de ce mécanisme nouveau.

De même, les premiers observateurs ont fait sur le mécanisme du vol les hypothèses les plus singulières; une connaissance moins imparfaite de l'anatomie de l'oiseau ne les eût pas permises.

Avant d'aborder l'étude physiologique de la locomotion aérienne, il est donc indispensable d'avoir certaines *notions zoologiques et anatomiques*. Il faut savoir la place que la classe des oiseaux occupe dans l'embranchement des vertébrés, comparer

la structure d'une aile à celle du membre antérieur d'un autre animal dont la locomotion soit plus facile à comprendre, chercher enfin si la forme du squelette, celle des muscles et des organes accessoires d'une aile d'oiseau n'autorisent pas certaines inductions sur la nature des mouvements du vol.

On a souvent répété que l'anatomie n'est pas suffisante pour expliquer la physiologie des organes. Cela est vrai, surtout pour certains d'entre eux : la forme et la structure du cerveau n'expliquent pas la pensée; l'étude anatomique de la rate n'a pas encore appris à quoi sert ce volumineux organe; mais il n'en est pas ainsi pour l'appareil locomoteur. On sait très bien, d'après la forme des surfaces articulaires, apprécier le sens et l'étendue des mouvements qu'une articulation permet. D'après le volume et les attaches d'un muscle, on estime la force et la nature des mouvements qu'il produit. La structure des plumes, la manière dont elles s'imbriquent, la position qu'elles prennent suivant que l'aile est étendue ou fléchie, tout cela se voit quand on dissèque une aile d'oiseau; or chacun de ces détails prendra une grande importance quand il s'agira d'expliquer le mécanisme du coup d'aile.

Le plan de cette étude est donc naturellement tracé. Dans une revue très sommaire, nous interrogerons successivement la zoologie, la morphologie comparée et l'anatomie descriptive; nous chercherons enfin, dans l'ensemble de la structure de l'oiseau, les conditions de son équilibre, de son glissement facile et de son appui sur l'air.

§ 34. **La zoologie rapproche les oiseaux des reptiles.** — Dès son origine, la *zoologie*, en même temps qu'elle distinguait les êtres vivants par leurs caractères propres, les classait en séries naturelles, rapprochant ceux qui présentaient entre eux les analogies les plus marquées. Elle a préparé presque inconsciemment le travail synthétique auquel nous assistons aujourd'hui et qui, d'après les analogies profondes entre certaines classes et certains genres d'animaux, tend à présenter des groupes entiers comme dérivant par transformations successives de certaines souches communes.

Or les zoologistes rapprochent les oiseaux des reptiles ; Huxley réunit ces deux classes en un seul groupe, les *Sauropsidés*. Les bases de ce rapprochement ne sont pas toutes également fécondes en applications physiologiques, mais quelques-unes sont importantes à signaler.

Dans la conformation du squelette, les zoologistes notent, chez les oiseaux comme chez les reptiles, la présence d'un condyle occipital unique, celle d'un *os carré* rattachant la mandibule au crâne. Ils montrent aussi que l'articulation apparente du cou-de-pied ne se fait pas, comme chez les mammifères, entre le tibia et l'astragale, mais entre les divisions antérieure et postérieure du tarse.

La découverte de cette particularité dans la structure des reptiles et des oiseaux rend compte d'une anomalie apparente qui choquait déjà Aristote. « L'oiseau, disait-il, offre cela de singulier qu'il a le genou tourné en arrière. » En effet, Aristote prenait l'articulation tibio-tarsienne pour le genou ; la jambe, pour lui, devenait donc la cuisse, et quant au véritable fémur de l'oiseau, il le méconnaissait et le considérait comme un os supplémentaire, sans analogue chez les autres vertébrés. La figure 16 montre les analogies réelles des os des membres postérieurs dans trois types de vertébrés, un homme, un quadrupède et un oiseau.

Si l'on compare les différentes pièces du squelette dans ces trois classes d'animaux, on trouve que dans l'oiseau le *tarse* manque.

La plupart des auteurs pensent, avec Gegenbauer et Huxley, qu'il y a fusion du tarse avec les parties voisines : la première rangée de ses os serait soudée avec le tibia et le péroné, la seconde avec le métatarse fondu lui-même en un os unique, le *canon*. Cette opinion est basée sur le développement de l'embryon des oiseaux.

Au reste, de quelque nom qu'on la désigne, l'articulation du cou-de-pied d'un oiseau présente anatomiquement les plus grandes ressemblances avec un genou. On y trouve, en haut, deux con-

dyles pareils à ceux d'un fémur; en bas, deux cupules comme celles d'un tibia; enfin, des ligaments croisés et des cartilages semi-lunaires complètent la ressemblance.

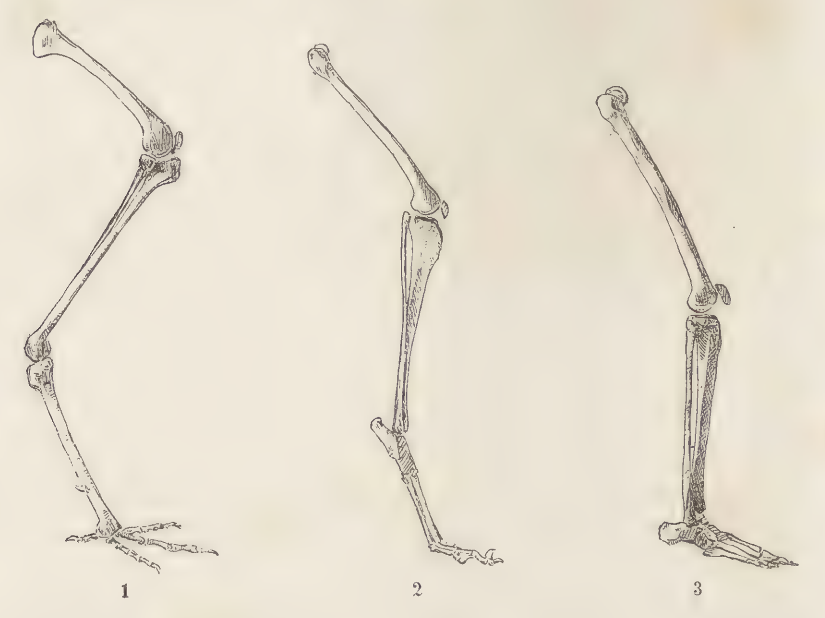


Fig 16. — Membres postérieurs comparés d'un Oiseau, 1; d'un Chien, 2; d'un Homme, 3.

L'erreur d'Aristote s'explique aisément par cette similitude; elle est du reste fort instructive, en montrant que les plus anciens naturalistes s'essayaient déjà à trouver dans la comparaison des organes les analogies qui existent entre les différentes espèces d'animaux.

Au membre antérieur, la fusion des os du carpe, réduits à deux chez les reptiles comme chez les oiseaux, donne une ressemblance aux squelettes de ces deux classes d'animaux. Les figures 17 et 18, empruntées à C. Vogt, montrent le squelette du membre antérieur droit de l'Archéoptéryx et le même membre du Crocodile. A part le nombre des doigts qui est de cinq dans le Crocodile et de trois dans l'Archéoptéryx, la ressemblance est très grande.

D'autres ressemblances existent encore entre les oiseaux et les reptiles ; elles portent sur la disposition de l'appareil circulatoire, sur la forme des globules du sang, sur les organes respiratoires, l'appareil urinaire, le système nerveux. Les reptiles sont pour la

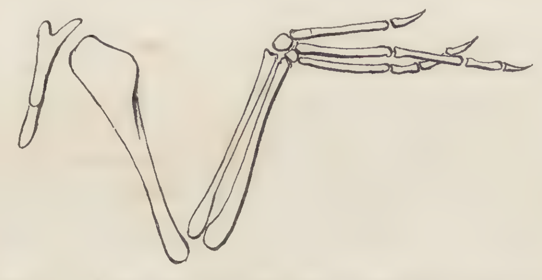


Fig. 17. — *Archéoptéryx*, membre antérieur droit (d'après C. Vogt).

plupart ovipares comme les oiseaux; enfin, il existe une grande similitude entre les embryons de certains reptiles et ceux des oiseaux. La figure 19, empruntée à Hæckel, montre l'extrême ressemblance d'un embryon de Tortue à la quatrième semaine avec

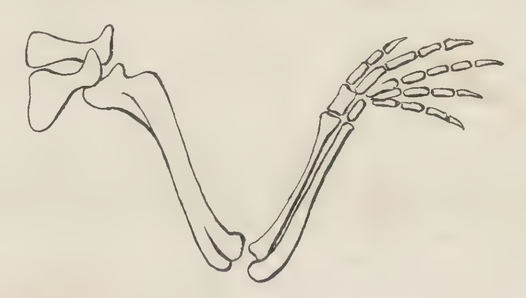


Fig. 18. — *Crocodile*, membre antérieur droit (d'après C. Vogt).

un embryon de Poulet au huitième jour. Un rudiment de carapace et un développement plus prononcé de la queue dans l'embryon de Tortue forment les seules différences entre ces deux êtres. Quant aux membres antérieurs, ce n'est guère que par le nombre des doigts qu'on peut distinguer celui qui sera une aile, de celui qui deviendra une patte de devant.

Suivons les analogies chez les deux êtres entièrement dévelop-

pés ; elles ne seront pas moins frappantes. Sans parler des animaux disparus, parmi lesquels l'Archéoptéryx réunissait la tête d'un reptile aux ailes et à la queue emplumées d'un oiseau, nous trouvons, dans les espèces actuellement vivantes, des ressemblances remarquables. Comparons, par exemple, la tête d'une Tortue de mer (fig. 20) à celle de certains oiseaux de proie : la ressemblance est



Fig. 19. — Embryons comparés d'une Tortue et d'un Poulet.

frappante. Elle ne s'arrête pas aux formes extérieures : la structure osseuse, la configuration des muscles et celle des centres nerveux continuent l'analogie. D'autre part, le membre antérieur de cette Tortue ressemble beaucoup à l'aile d'un Pingouin par sa forme et par son aspect ; ces deux sortes d'organes sont exclusivement destinés à la locomotion dans l'eau. Au point de vue de la fonction, ils sont identiques.

En effet, le Pingouin vole dans l'eau, comme Pettigrew l'a très

bien vu et représenté[1] (fig. 21). Dans certaines circonstances, la Tortue exécute dans l'eau des mouvements qui ressemblent beaucoup à ceux du vol.

Si l'on observe une Tortue marine dans un aquarium, on voit qu'elle a deux types différents de locomotion : tant que l'animal

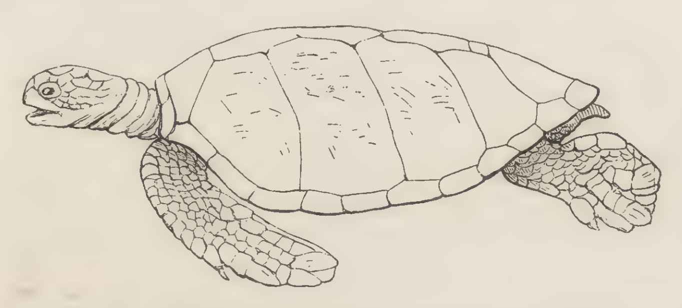


Fig. 20. — Tortue Caouane (Tortue de mer) (d'après Durand de Gros).

rampe sur le sol, il marche comme les quadrupèdes ; d'après Carlet, la Tortue paludine aurait pour allure ordinaire une sorte



Fig. 21. — Pingouin volant dans l'eau (d'après Pettigrew).

de trot lent. Mais si la Tortue quitte le sol et se transporte à travers l'eau, elle change aussitôt d'allure. Les membres postérieurs s'accolent l'un à l'autre, s'allongent en arrière et

1. Pettigrew, *Of the Physiology of Wings*, fig. 41. (Transactions of the Royal Society of Edinburg, 1871.)

restent immobiles, tandis que les membres antérieurs, j'allais dire les ailes, frappent l'eau synchroniquement.

Ils s'abaissent en se portant en avant; leur extrémité, étalée en forme de nageoire, s'incline sur la résistance de l'eau et tourne en arrière sa face inférieure. En se relevant, le membre s'incline en sens inverse et coupe l'eau par sa tranche, jusqu'à la fin de la remontée. Quand nous analyserons la fonction de l'aile de l'oiseau, nous retrouverons la même suite de mouvements dans l'acte du vol ramé.

Entre le Pingouin et la Tortue, la différence consiste principalement dans la rapidité inégale des mouvements. Le Pingouin vole dans l'eau avec une agilité extrême; la Tortue, avec une extrême lenteur. Or la lenteur de ces mouvements est une condition précieuse qui permet de les étudier à l'aise, tandis que ceux de l'oiseau échappent à l'observation par leur trop grande rapidité.

Du reste, ce que nous voyons se passer dans les eaux froides de nos *aquariums* n'est, paraît-il, qu'un type fort imparfait de la locomotion des Tortues aquatiques. Audubon [1], parlant de la Tortue à bec de Faucon et de la Tortue verte, dit que ces animaux rappellent, par la rapidité et l'aisance de leurs mouvements, le vol de l'oiseau; aussi les pêcheurs réussissent-ils rarement à les frapper avec leur épieu.

§ 35. **Notions d'anatomie comparée.** — L'anatomie comparée montre que les membres des animaux vertébrés, tout en restant formés des mêmes pièces fondamentales, revêtent maintes formes différentes appropriées à la fonction qu'ils exécutent dans chaque groupe zoologique, dans chaque genre et même dans chaque espèce.

Le membre antérieur, par exemple, qu'il soit un bras, une jambe d'avant, une patte, une aile ou une nageoire, présente les mêmes éléments constitutifs. La déformation, la fusion ou la disparition de certaines pièces osseuses, l'absence ou l'atrophie de certains muscles avec prédominance de quelques autres, le

1. Audubon, *loc. cit.*, t. I, p. 454.

développement de certaines productions cutanées, ongles, griffes, sabots, plumes ou écailles, tels sont les caractères qui différencient le membre antérieur, en l'adaptant à la fonction qu'il doit remplir.

Quand on compare l'aile d'un oiseau au bras d'un homme, l'homologie de ces deux membres est masquée au premier abord

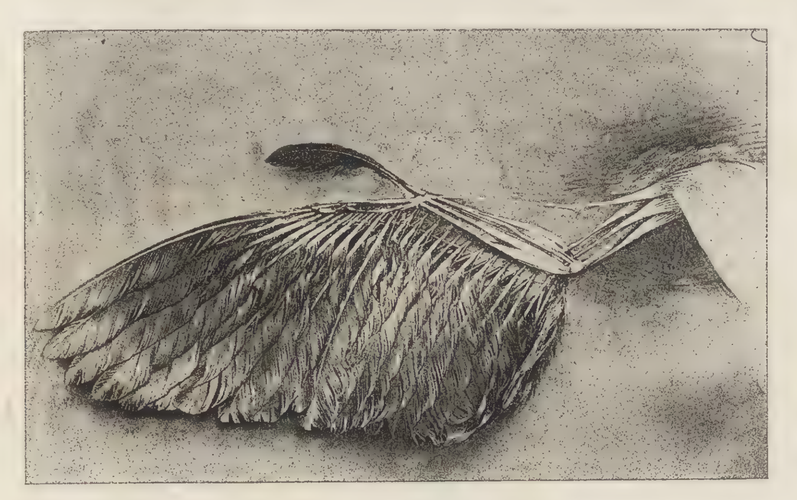


Fig. 22. — Aile disséquée d'une Poule.

par le développement énorme des plumes. Mais qu'on enlève avec la peau ces appendices qui s'y rattachent, aussitôt la ressemblance devient frappante (fig. 22).

Au XVIe siècle déjà, P. Belon traçait le parallèle des pièces osseuses d'une aile avec celles du bras de l'homme (fig. 23). La *clavicule* correspondait, d'après lui, à l'*os coracoïdien;* l'*omoplate*, de part et d'autre, constitue un os indépendant. Au bras l'*humérus*, à l'avant-bras le *radius* et le *cubitus* sont parfaitement reconnaissables. Mais le *carpe* de l'oiseau a subi une atrophie notable ou plutôt une fusion de ses os qui, de sept qu'ils sont chez l'homme, se réduisent à deux seulement chez l'oiseau : l'un radial, l'autre cubital. Le métatarse et les doigts sont plus modifiés encore. Le pouce est libre, souvent il est réduit à une seule phalange, c'est ce doigt qui forme l'*aile bâtarde*, petit

bouquet de plumes qui semble doué d'une mobilité indépendante[1]. Les autres pièces de la main sont fusionnées en un double doigt dont les phalanges sont soudées sur une grande

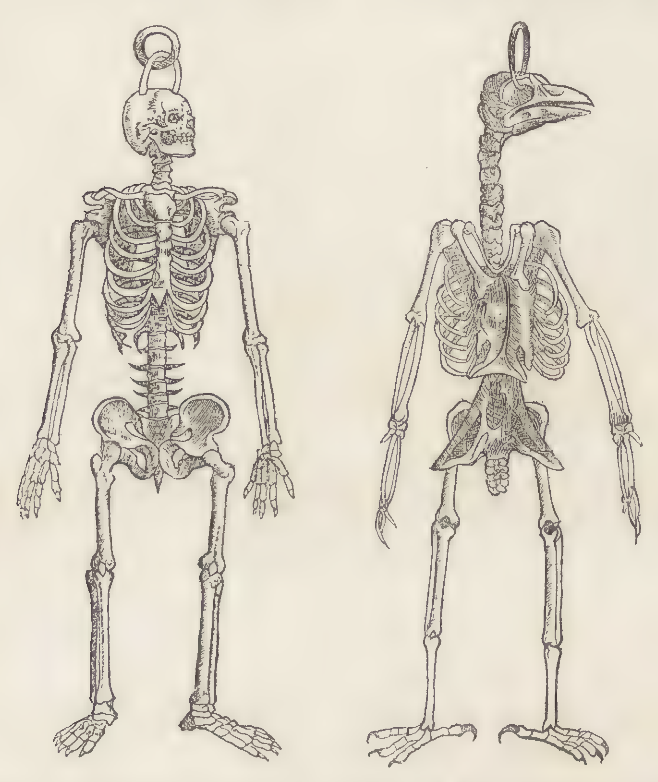


Fig. 23. — Comparaison des squelettes d'un homme et d'un oiseau (d'après Pierre Belon).

partie de leur longueur. C'est à la main qu'adhèrent les grandes pennes ou rémiges, c'est-à-dire les plumes les plus fortes, qui forment ce qu'on nomme le *fouet* de l'aile.

1. Frédéric II, empereur d'Allemagne, qui fut grand fauconnier, écrivit un traité *De arte venandi,* où il expose longuement l'anatomie de l'oiseau. Cet auteur attache une grande importance aux ailes bâtardes (*empiniones*), pour infléchir à droite ou à gauche les mouvements du vol. On conçoit que si l'un de ces groupes de plumes se détache des autres et se présente contre la résistance de l'air, cela puisse ralentir le mouvement de l'aile correspondante et dévier de ce côté l'axe du vol.

Cette conception de l'extrémité de l'aile comme l'homologue d'une main dont les pièces osseuses seraient fusionnées n'a rien d'hypothétique. La paléontologie montre à chaque instant des exemples d'une pareille fusion. Dans les Solipèdes, par exemple, on peut suivre le passage du type à quatre doigts que représentait l'*Orohippus*, espèce disparue, jusqu'au cheval actuel, qui n'a plus qu'un seul doigt.

Parmi les espèces volantes, l'*Archéoptéryx* avait trois doigts distincts ; la plupart des oiseaux n'en ont qu'un seul formé par deux phalanges soudées l'une à l'autre, mais encore reconnaissables.

En comparant les squelettes des ailes de différentes espèces d'oiseaux, on trouve de grandes inégalités dans les dimensions relatives des divers rayons du membre : bras, avant-bras et main. D'Esterno a montré qu'à longueur égale de l'humérus, les autres rayons ont des proportions très variables, ainsi qu'on le voit dans les figures 24, 25, 26.

L'un des types représentés correspond à l'Autruche, qui est incapable de voler ; mais les deux autres appartiennent à d'admirables *voiliers*, l'Albatros et la Frégate. Il doit y avoir une différence dans la manière de voler de ces deux derniers oiseaux, dont l'aile est si différemment conformée, mais aucun auteur ne l'a encore signalée.

§ 36. **Cavités aériennes des os.** — Les os de l'aile présentent un caractère important : ils sont creux et remplis d'air, comme l'a reconnu Frédéric II. Un trou spécial, percé au-dessous de la tête de l'humérus, met la cavité de cet os en rapport avec les voies respiratoires. Les chasseurs ont souvent remarqué, sur les oiseaux qui ont l'humérus brisé par un plomb, que des bulles d'air s'échappent à travers le sang de la blessure.

Cette disposition des os de l'aile a été considérée comme fort avantageuse. Galilée a montré que la forme d'un cylindre creux est celle qui répartit la matière osseuse de manière à donner le maximum de résistance avec le moindre poids. Or ce sont deux qualités également importantes pour une aile, que la force et la légèreté, à cause des grands efforts qu'elle doit supporter et

PROPORTIONS RELATIVES DES DIFFÉRENTS RAYONS OSSEUX DE L'AILE CHEZ DES OISEAUX D'ESPÈCES DIVERSES

(d'après d'ESTERNO).

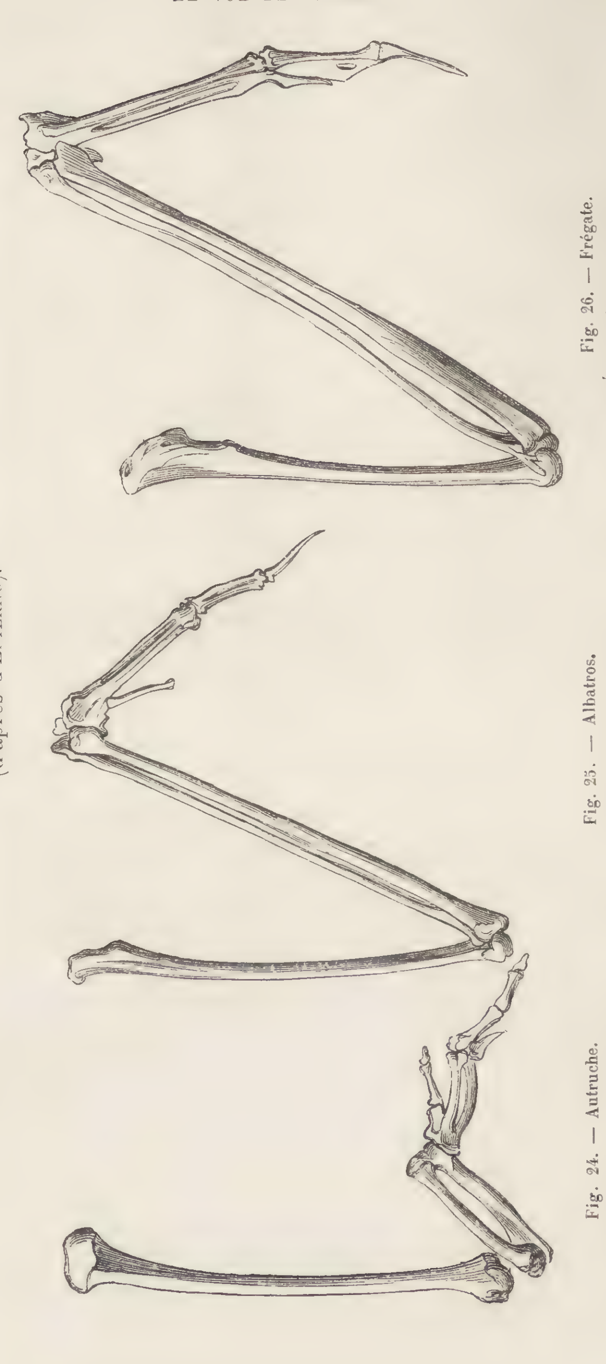


Fig. 24. — Autruche.
Échelle de $0^{m},18$ par mètre.

Fig. 25. — Albatros.
Échelle de $0^{m},13$ par mètre.

Fig. 26. — Frégate.
Échelle de $0^{m},33$ par mètre.

des mouvements rapides qu'elle doit accomplir : trop de masse à mouvoir eût causé des résistances d'inertie très désavantageuses[1].

§ 37. **Des articulations de l'aile; solidarité de leurs mouvements.** — L'étude des articulations, de leurs formes et de l'étendue des mouvements qu'elles permettent, éclaire la fonction de l'aile.

Logée dans une cavité située à la jonction de trois os (la fourchette, l'os coracoïdien et l'omoplate), la tête de l'humérus présente une surface convexe dont la forme varie chez les différentes espèces d'oiseaux. Or, si l'on cherche dans la série des vertébrés comment la tête humérale se modifie suivant les mouvements que le membre antérieur exécute, on voit qu'il existe des relations étroites entre la forme anatomique et les caractères du mouvement. Si le membre peut se mouvoir presque également dans tous les sens, comme cela se voit sur l'homme et sur les singes, la tête de l'humérus est de forme sphérique. Une forme analogue à celle des primates s'observe aussi dans les lémuriens. Mais sur les herbivores, dont le membre antérieur, exclusivement destiné à la marche, ne fait guère qu'osciller dans un plan, la tête humérale n'offre plus de courbure que dans un sens : elle prend sensiblement la forme d'un segment de cylindre ou de poulie. Enfin, quand une surface articulaire présente des courbures inégales dans les différents sens, c'est que l'étendue des mouvements est inégale aussi : les mouvements les plus étendus répondent à la courbure du moindre rayon.

Sur la tête de l'humérus d'un oiseau à grandes ailes, d'un Héron par exemple, qui vole avec des battements de faible étendue, on trouve une surface articulaire de contour elliptique. Dans l'attitude du vol, c'est-à-dire quand l'oiseau est horizontalement couché sur l'air, le grand axe de la tête de l'humérus est vertical; le petit axe, au contraire, est dirigé d'avant en arrière. De sorte que la tête de l'humérus ayant sa

1. Toutefois, la présence de l'air dans les os ne semble pas être en rapport constant avec l'aptitude au vol; on trouve, en effet, des os creux et pleins d'air chez certains oiseaux qui ne volent pas.

courbure de plus grand rayon dans le sens vertical, montre que les mouvements propres du vol sont moins étendus chez le Héron que ceux qui correspondent au déploiement et au reploiement des ailes. En effet, pour passer de la position de repos à celle d'action, l'humérus, qui était accolé au corps, s'en détache et décrit un angle de près de 80°, tandis que dans le vol, entre les positions extrêmes d'élévation et d'abaissement des ailes, le déplacement angulaire de l'humérus est environ moitié moindre.

Mais chez les oiseaux dont les ailes ont peu de surface et exécutent des battements de grande amplitude, chez le Guillemot par exemple, ces organes ont à peu près la même étendue de mouvement dans tous les sens; aussi, la tête humérale est-elle presque sphérique [1].

§ 38. **Articulations de l'aile; solidarité de leurs mouvements.** — Les articulations du coude et de la main s'ouvrent et se ferment en sens inverse l'une de l'autre : la pointe du coude fermé est tournée en arrière, celle de la main pliée est tournée en avant. Strauss-Durckheim a montré que les mouvements de ces deux articulations sont solidaires et que le coude ne peut s'ouvrir ni se fermer sans que la main s'ouvre ou se ferme pareillement. Le mécanisme qui assure cette solidarité est fort curieux : le radius et le cubitus subissent dans les mouvements du coude un déplacement de leurs extrémités cubitales l'une par rapport à l'autre; par suite d'un glissement des deux os l'un contre l'autre, ce déplacement se transmet jusqu'à leurs extrémités carpiennes et commande le mouvement de la main.

Je me suis assuré cependant, sur différentes espèces d'oiseaux, que cette disposition des os et des surfaces articulaires n'établit entre les mouvements du coude et de la main qu'une solidarité incomplète. Ainsi, la plus grande extension possible du coude ne produit pas l'extension maximum de la main; celle-

1. Il est difficile d'affirmer que cette loi soit générale, car le nombre d'oiseaux que j'ai pu étudier à cet égard est assez restreint, mais il est probable qu'elle ne souffre pas d'exception. Pour la vérifier, il faudrait connaître le type du vol et la conformation anatomique de chaque espèce d'oiseaux.

ci peut, sous l'influence de l'action musculaire, s'étendre encore d'une quinzaine de degrés.

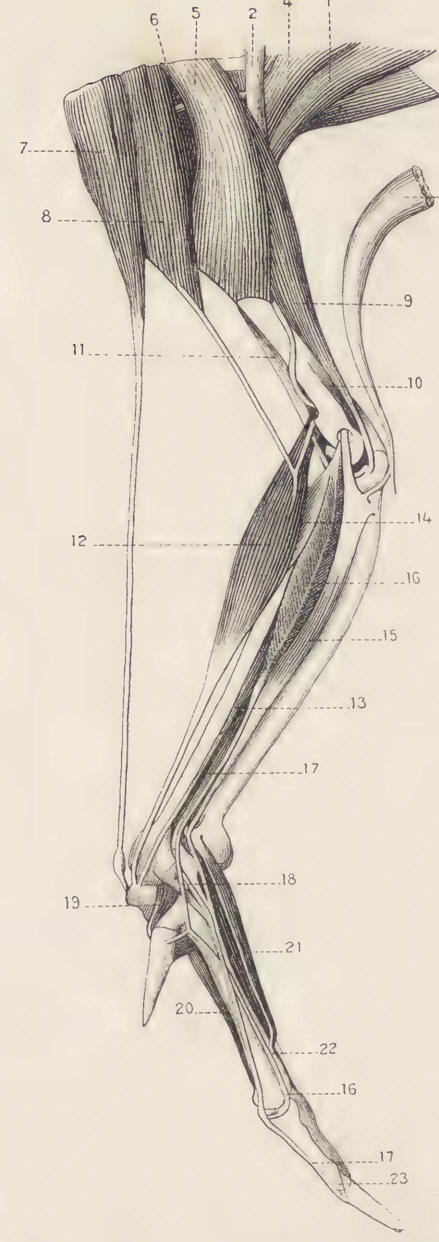
Il est important de noter cette indépendance partielle des mouvements du coude et de la main, car elle explique certains faits que l'observation a montrés. Dans les évolutions de l'oiseau, Léonard de Vinci a signalé des cas où, l'humérus étant accolé au corps, le fouet de l'aile se déploie; un tel acte serait impossible si le coude et la main s'ouvraient ou se fermaient d'une façon entièrement solidaire.

§ 39. **Des muscles de l'aile d'un oiseau.** — Ces muscles ont assez de ressemblance avec ceux du bras d'un homme pour que Vicq-d'Azyr ait pu les décrire sous les mêmes noms. L'inspection des figures 27 et 28 donne une idée sommaire de cette ressemblance[1].

Toutefois, les naturalistes éprouvent encore des difficultés pour rattacher certains muscles de l'aile de l'oiseau à leurs homologues dans le membre antérieur des autres vertébrés. Ainsi, à la partie supérieure de l'aile, se trouve un muscle volumineux dont le tendon passe au devant du coude, comme la corde d'un arc, et va s'attacher à la base du pouce. C'est le *tenseur de la membrane antérieure de l'aile*. Rappelant, par sa forme et par sa position, le deltoïde de l'homme, ce muscle se rattache, à d'autres égards, au grand pectoral dont il semble être une expansion.

Le muscle grand pectoral, parfaitement reconnaissable à ses insertions au sternum, à la clavicule et à l'humérus, est l'abaisseur de l'aile; son développement est énorme : à eux seuls, les deux grands pectoraux pèsent autant que tous les autres muscles du corps. Dans aucun groupe d'animaux on ne trouve un muscle pareillement développé; c'est que le grand pectoral effectue presque tout le travail mécanique dépensé dans le vol. En effet, c'est dans son abaissement que l'aile frappe l'air avec force pour soutenir et propulser l'oiseau, tandis que la remontée de l'aile et ses mouvements d'extension ou de flexion n'exigent que peu d'efforts.

1. Voir Alix, *Essai sur l'appareil locomoteur des oiseaux*. Paris, G. Masson, 1874.



1. Grand dorsal.

2. Faisceau trapézoïde du grand dorsal.

3. Tendon de la membrane axillaire.

4. Grand rond.

5. Deltoïde postérieur.

6. Sous-épineux.

7. Tenseur marginal de la membrane antérieure de l'aile.

8. Tenseur moyen de la membrane antérieure.

9. Longue portion du triceps.

10. Vaste externe.

11. Biceps.

12. Long supinateur.

13. Long abducteur du pouce.

14. Court supinateur.

15. Cubital postérieur.

16. Extenseur du pouce et de la première phalange du deuxième doigt.

17. Extenseur de la deuxième phalange du deuxième doigt.

18. Son accessoire.

19. Court extenseur dorsal du pouce.

20. Adducteur de la deuxième phalange du deuxième doigt.

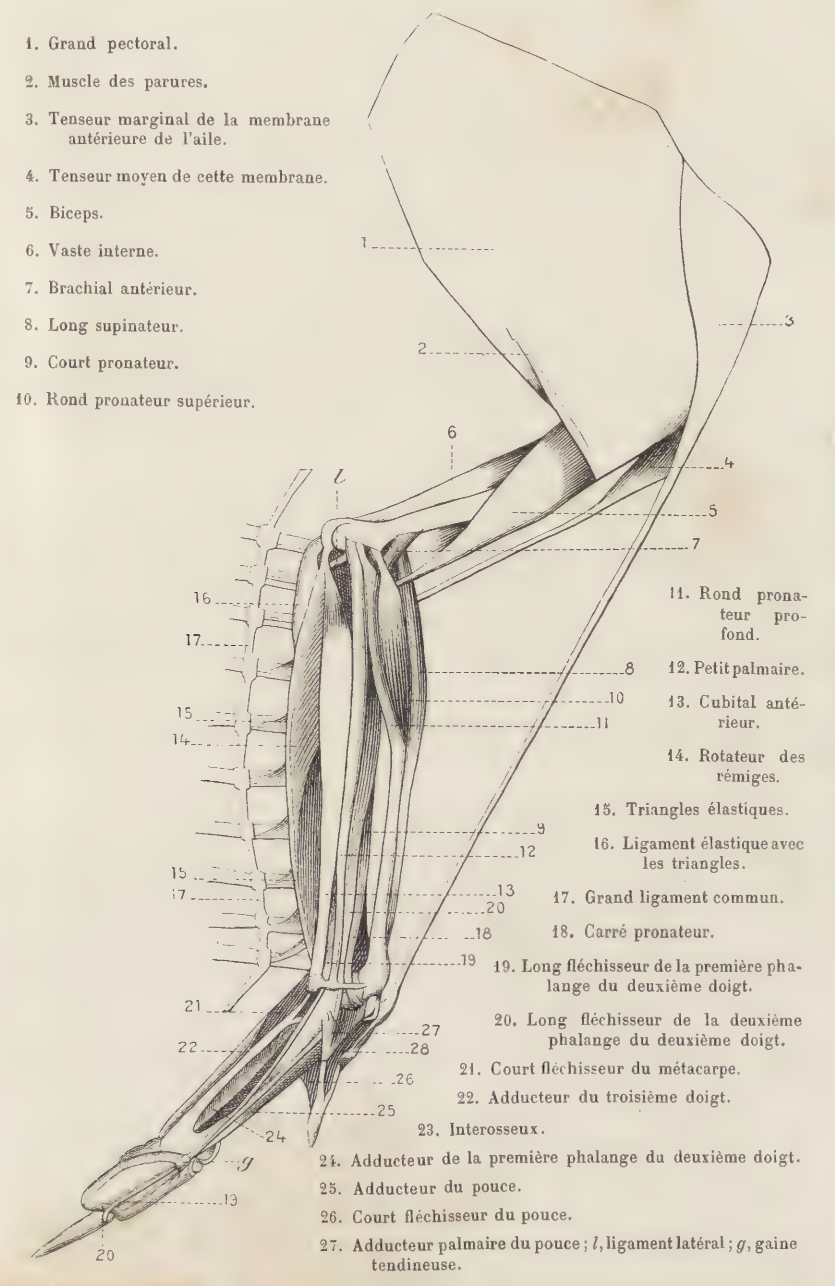
21. Court fléchisseur du métacarpe.

22. Adducteur du troisième doigt.

23. Interosseux.

(L'anconé ne se voit pas.)

Fig. 27. — Muscles de la région postérieure de l'aile de la Crécerelle (*Falco tinnunculus*), d'après Alix.



1. Grand pectoral.
2. Muscle des parures.
3. Tenseur marginal de la membrane antérieure de l'aile.
4. Tenseur moyen de cette membrane.
5. Biceps.
6. Vaste interne.
7. Brachial antérieur.
8. Long supinateur.
9. Court pronateur.
10. Rond pronateur supérieur.
11. Rond pronateur profond.
12. Petit palmaire.
13. Cubital antérieur.
14. Rotateur des rémiges.
15. Triangles élastiques.
16. Ligament élastique avec les triangles.
17. Grand ligament commun.
18. Carré pronateur.
19. Long fléchisseur de la première phalange du deuxième doigt.
20. Long fléchisseur de la deuxième phalange du deuxième doigt.
21. Court fléchisseur du métacarpe.
22. Adducteur du troisième doigt.
23. Interosseux.
24. Adducteur de la première phalange du deuxième doigt.
25. Adducteur du pouce.
26. Court fléchisseur du pouce.
27. Adducteur palmaire du pouce ; *l*, ligament latéral ; *g*, gaine tendineuse.

Fig. 28. — Muscles de la région antérieure de l'aile du *Falco tinnunculus*, d'après Alix.

§ 40. **Développement énorme et importance fonctionnelle du grand pectoral.** — Sauf aux premiers instants du vol, la remontée de l'aile est presque automatique, ainsi qu'on le verra plus loin. Un muscle spécial lui est toutefois affecté : c'est le *moyen pectoral* situé sous le précédent et dont le tendon se réfléchit en contournant la tête de l'humérus.



Fig. 29. — Squelette du Flamant.

Les fléchisseurs et les extenseurs de l'avant-bras sur le bras correspondent à ceux qui, chez l'homme, produisent les mêmes actes. La fusion des doigts, et par suite l'absence de leurs mouvements individuels, impliquent de telles modifications des muscles de la main de l'oiseau, qu'on n'a pas encore réussi à en établir les homologies avec ceux de l'homme.

C'est en définitive le grand pectoral qui, par son importance,

mérite le plus d'être étudié et comparé d'une espèce à l'autre, au point de vue de son volume et de sa forme dans les différents types d'oiseaux. Sans avoir besoin d'en faire la dissection, chacun peut aisément apprécier cette forme et ce volume sur un grand nombre d'espèces différentes, en examinant leurs squelettes dans une galerie zoologique. En effet, le *sternum* des oiseaux présente, de chaque côté de sa crête médiane ou *brechet*, deux



Fig. 30. — Squelette du Guillemot.

gouttières, plus ou moins profondes et plus ou moins allongées, que les muscles pectoraux remplissent entièrement. Quand ces gouttières sont rudimentaires, comme dans l'Autruche et l'Aptéryx, c'est que, chez ces oiseaux, les muscles pectoraux sont atrophiés et que l'animal est inapte au vol. Des gouttières courtes, larges et profondes, montrent que les muscles qui les remplissaient étaient *gros* et *courts;* longues et étroites, ces

gouttières correspondent à des pectoraux *longs* et *grêles*. Or ces deux formes de muscles produisent des mouvements de caractères bien différents ; elles sont associées à des formes d'ailes très différentes aussi, enfin elles correspondent à deux types de vol dissemblables, ainsi que je le démontrerai plus loin.

Si l'on néglige les formes intermédiaires, pour ne considérer dans la structure des oiseaux que les types extrêmes, on constate les relations suivantes :

Un sternum court et large (fig. 29) implique l'existence d'ailes longues et de grande surface ; l'espèce d'oiseau à laquelle il appartient vole en donnant des battements rares et peu étendus ; elle est, en général, apte au vol à voile : tels sont l'Aigle, la Frégate, le Pélican, le Flamant, etc.

Un sternum long et étroit (fig. 30) s'accompagne d'une aile courte et de faible surface. Avec cette conformation, l'oiseau donne des coups d'ailes fréquents et très étendus ; jamais il ne pratique le vol à voile ; tels sont les Canards, Guillemots, Râles, etc. Cette relation entre la conformation du sternum et celle de l'aile est fort importante, car elle éclaire le mécanisme du vol ; je l'ai trouvée d'après des considération sthéoriques dont il sera question plus loin.

§ **41. Des membranes alaires.** — Réduite à son squelette et à ses muscles, l'aile n'aurait que bien peu de surface pour frapper l'air, mais des organes de perfectionnement, les *membranes alaires* et les *plumes* en font un appareil admirablement adapté à sa fonction.

L'une des membranes alaires, l'*antérieure*, s'étend de l'épaule à la main (fig. 31), comblant l'angle que forme la flexion du coude ; la *postérieure*, non représentée dans la figure, s'étend de la pointe du coude aux flancs. Ces membranes sont formées par des replis de la peau doublés de ligaments élastiques[1] en forme de bandelettes qui les maintiennent toujours tendues, quel que

1. Voir Robin et Chabry, *Journal de l'Anatomie et de la Physiologie*, 1884, et G. Buchet, première Note *sur l'appareil tenseur de la membrane antérieure de l'aile des oiseaux*. Société de biologie, 7 avril 1888.

soit le degré de flexion ou d'extension de l'*aile*. Des muscles spéciaux, de provenances différentes chez les diverses espèces d'oiseaux, rendent cette tension plus complète encore.

La structure des membranes alaires n'est pas la même dans tous les oiseaux. D'après Pettigrew, la membrane antérieure contient, chez certaines espèces, de nombreux épanouissements de fibres tendineuses. Ainsi, sur la Bécasse, le muscle tenseur de la mem-

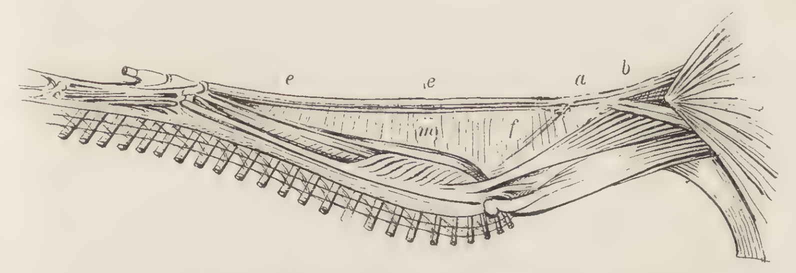


Fig. 31. — Membrane alaire antérieure de la Bécasse (d'après Pettigrew).

brane, *a b* (fig. 31), se prolongerait par une bandelette élastique à faisceaux multiples *e e*, d'où émanerait une expansion fibreuse *f* rampant dans l'intérieur de la membrane *m*. Chez les oiseaux de petite taille, un faisceau élastique s'étend, comme la flèche d'un arc, du bord antérieur du ligament à la partie interne du coude.

L'élasticité des membranes de l'aile leur donne une tendance continuelle à fléchir les articulations de ce membre[1]. D'après Pettigrew, qui en a fait une étude soignée, leur élasticité serait

1. Pour leur fonction, comme pour leur structure, on peut assimiler les membranes alaires des oiseaux aux membranes bien plus parfaites des Chauves-Souris et même aux expansions qui réunissent les doigts palmés de certains oiseaux, les Palmipèdes. Un même moyen a été employé par la Nature afin d'agrandir les surfaces des membres, qui doivent prendre appui sur un fluide. L'extrême mobilité de l'air exigeait, pour les êtres volants, des surfaces plus larges que celles qui suffisent aux animaux nageurs. Aussi, la Chauve-Souris est-elle pourvue de larges voiles, souples et élastiques, réunissant entre eux ses doigts extrêmement allongés, et s'étendant même des membres antérieurs aux membres postérieurs et à la queue. Dans le *Ptérodactyle*, un seul doigt, énormément allongé, portait la membrane qui s'attachait sans doute au membre postérieur, afin de former l'aile.

à son maximum chez les petits oiseaux, dont les coups d'ailes sont très rapides ; ces membranes agissent alors comme des fléchisseurs automatiques des ailes, et leur action alternerait avec celle des muscles extenseurs, dont elles représenteraient les antagonistes.

Comparées à celles des Chauves-Souris, les membranes alaires de l'oiseau sont presque rudimentaires; mais les plumes forment dans leur ensemble un voile élastique d'une perfection admirable, adapté par sa forme et par son étendue au type de vol de chaque espèce d'oiseau.

CHAPITRE IV

PLUMES ET RÉMIGES

Des plumes de l'oiseau. — Des rémiges, leur force inégale dans les différentes parties de l'aile. — Structure des rémiges; leur classification. — Imbrication des rémiges, leurs mouvements associés automatiquement à ceux du déploiement et du reploiement de l'aile. — Ligaments élastiques et muscles rotateurs des rémiges. — Des couvertures. — Divisions de l'aile : aile passive et aile active. — Aile voilière et aile rameuse; rémiges voilières. — De la queue de l'oiseau et de ses mouvements.

§ **42. Des plumes de l'oiseau.** — Les plumes sont des annexes de la peau, comme les poils chez les mammifères; superposées les unes aux autres à la manière des tuiles d'un toit, elles forment à l'oiseau un revêtement qui le protège contre les plus grands abaissements de température. Au milieu des glaces polaires, les Canards gardent une température supérieure à 41° centigrades[1] : cette chaleur semble indispensable aux muscles pour que les mouvements du vol aient la rapidité nécessaire .

Le sens dans lequel les plumes sont imbriquées est tel, que le vent qui frappe l'oiseau de face ne fait que lisser son plumage et serrer davantage les plumes entre elles. Or l'oiseau, en raison de sa vitesse propre, reçoit presque toujours le vent dans ce sens.

§ **43. Des rémiges.** — Les grandes plumes des ailes ou *rémiges* sont particulièrement intéressantes au point de vue du vol; par leur structure et leurs mouvements, elles constituent l'appareil

1. Martins, *Mémoire sur la température des oiseaux palmipèdes du nord de l'Europe*. Journal de la Physiologie, 1858.

2. Voir pour les changements de durée des actes musculaires sous l'influence de la température : Marey, *Du mouvement dans les fonctions de la vie*, p. 344. Paris, 1868.

essentiel d'adaptation de l'aile à sa fonction. Tant que le développement des rémiges n'est pas complet, les jeunes oiseaux sont incapables de voler et ne quittent pas le nid.

Les rémiges sont rudimentaires chez le Pingouin et réduites à l'apparence d'écailles chez le Manchot qui ne vole pas; elles s'allongent et s'étalent en larges surfaces chez les bons volateurs, d'autant plus fortes et plus grandes qu'elles s'implantent plus près de l'extrémité de l'aile et que, par conséquent, elles se meuvent plus vite et trouvent dans l'air plus de résistance[1].

Cette relation entre la force des rémiges et les résistances qu'elles ont à soutenir est un des nombreux exemples de l'adaptation parfaite des organes à leurs fonctions.

Mouillard pense que chez certains oiseaux tels que la Huppe, le Pluvier, le Vanneau, l'Ibis, les rémiges extrêmes sont seules capables de prendre appui sur l'air dans le coup d'aile, les autres étant trop minces et trop faibles pour agir utilement.

Les rémiges les plus fortes sont aussi les plus solidement implantées sur l'aile : celles qui s'attachent au grand doigt sont logées dans des fossettes creusées à l'intérieur de l'os. Au carpe, les attaches sont solides encore, mais plus superficielles; les rémiges qui se fixent au cubitus n'y adhèrent que par leurs pointes; enfin, du coude au tronc, elles sont flottantes au bord de la membrane alaire postérieure.

§ 44. **Structure des rémiges.** — Considérée isolément, une rémige offre un exemple frappant de la parfaite adaptation d'un organe à sa fonction. La rémige est construite sur le type des autres plumes, mais se caractérise par sa force, par sa grande surface, son élasticité et sa légèreté.

Le tuyau ou *canon* est un tube de substance cornée qui réunit la force à la légèreté. La section de ce tube n'est point circulaire, mais correspond à une ellipse dont le grand axe, qui offre la résistance *maxima*, est dirigé dans le sens où se produisent les plus grands efforts. Ce tuyau est engagé dans une

1. Bishop. Article *Motion* (Todd's Cyclopedia of Anat. and Physiol. 1887).

gaine membraneuse formée d'un repli de la peau doublé de ligaments; ces derniers maintiennent les rémiges à leurs distances respectives et leur impriment des mouvements d'ensemble dont il sera question plus loin.

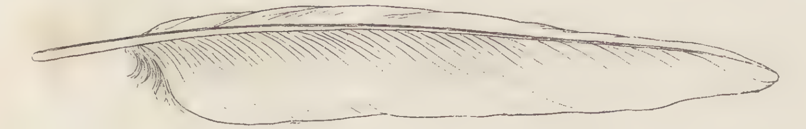


Fig. 32. — Une rémige d'oiseau rameur (d'après Prechtl).

A la suite du tuyau, la tige s'étend en s'amincissant jusqu'à l'extrémité de la rémige. Cette tige est courbée en arc dont la concavité regarde en bas et en arrière ; elle est formée d'une substance blanche, élastique, renfermée dans un étui corné extrême-



Fig. 33. — Courbure de la rémige, vue de profil (d'après Prechtl).

ment rigide et de forme quadrangulaire. La face inférieure de la tige présente sur toute sa longueur un sillon médian, tandis que la face supérieure ou *rachis* est convexe. Cette structure donne à la rémige une solidité et une légèreté que nulle autre substance peut-être ne possède à un degré semblable.

Fig. 34. — Barbes d'une plume.

Sur les côtés de la tige s'étalent les *lames*, formées de *barbes*, minces lamelles cornées placées de champ et serrées les unes contre les autres, comme les dents d'un peigne fin.

De chaque barbe se détachent de petites franges ou *barbules* qui portent à leur tour des villosités microscopiques, les *barbelles*. Ces aspérités engrenées les unes dans les autres font adhérer entre elles les barbes de la plume. Quand un accident a froissé le plumage de ses ailes, l'oiseau les frotte avec son bec, pour rétablir les adhérences rompues.

Les deux lames d'une rémige ne sont ni symétriques ni égales : l'une est trois ou quatre fois plus large que l'autre. En outre, les barbes de la lame large sont implantées sur la tige sous un angle moins aigu que celles de la lame étroite : la somme de ces deux angles équivaut à 90° environ.

Dans chaque rémige, la large lame est tournée en dedans, c'est-à-dire du côté de l'axe du corps. Quant à l'ensemble des rémiges, il présente l'imbrication des lames d'un éventail. La première rémige, ou rémige externe, est la plus basse de toutes; sa large lame est recouverte par la courte lame de la deuxième rémige et ainsi de suite. Cette disposition donne à l'intervalle de deux rémiges consécutives l'aspect et surtout la fonction d'une soupape qui s'ouvrirait de haut en bas en livrant passage à l'air, tandis que, de bas en haut, cette soupape se fermerait. L'aile, dans son ensemble, serait donc perméable à l'air quand elle s'élève, imperméable quand elle s'abaisse.

Beaucoup d'auteurs ont donné à ce jeu de soupapes un rôle capital dans le mécanisme du vol.

Maurand[1] a développé cette théorie en l'appuyant sur quelques expériences. D'autre part, un grand nombre d'aviateurs ont proposé ou réalisé une disposition analogue dans la construction d'ailes artificielles. On verra plus loin dans quelles circonstances se produisent ces mouvements individuels des rémiges de l'oiseau.

§ 45. **Classification des rémiges.** — Les rémiges sont de trois sortes, suivant le segment de l'aile dont elles font partie.

Les rémiges *primaires* s'attachent à la main et forment le *fouet* de l'aile ; les *secondaires* ou cubitales occupent toute la longueur de l'avant-bras et s'implantent sur le bord externe du cubitus auquel elles laissent ordinairement des empreintes. Sur beaucoup de squelettes d'oiseaux, ces empreintes permettent de déterminer le nombre des rémiges que portait le cubitus.

Enfin les rémiges *tertiaires* s'échelonnent du coude aux flancs, en s'implantant sur la membrane axillaire.

1. Maurand, *L'Aéronaute*, 1870, p. 75.

Les rémiges primaires sont au nombre de 10, en général; elles décroissent de longueur, à partir de l'extrémité de l'aile. Cette règle présente toutefois des exceptions : chez certains oiseaux, la rémige la plus longue est la première (Hirondelle de mer), chez d'autres c'est la seconde (Faucon), la troisième (Engoulevent), la quatrième (Buse) ou même la cinquième (Geai). Cela crée des différences dans la forme des ailes, dont l'extrémité est tantôt pointue comme dans le Faucon, tantôt arrondie et obtuse comme chez les grands *voiliers*.

§ 46. **Mouvements des rémiges.** — Suivant que la main s'ouvre ou se ferme, les rémiges primaires s'étalent ou se resserrent et ces mouvements à leur tour sont solidaires de l'extension ou de la flexion des différents rayons de l'aile.

Quand l'aile s'étend, la main, tirée par le muscle petit palmaire, se courbe dans son ensemble, de telle sorte que son bord posté-



Fig. 35. — Imbrication des rémiges d'une aile ployée ; croisement des tuyaux des rémiges primaires et des secondaires.

rieur, sur lequel les rémiges sont implantées, prend la forme convexe. Les rémiges primaires s'étalent alors en rayonnant et s'écartent les unes des autres, autant que le permettent les ligaments qui règlent les distances respectives de ces plumes. Quand l'aile se reploie (fig. 35), la main se fléchit sur l'avant-bras et en même temps son bord postérieur devient concave. L'effet de ce chan-

gement de courbure est de rapprocher les rémiges les unes des autres, jusqu'à ce que leurs tuyaux se touchent entre eux. Le fouet de l'aile est alors fermé au maximum; cet effet se produit automatiquement par le retrait de certains ligaments élastiques dont nous aurons à parler.

Les rémiges secondaires ont aussi des mouvements, suivant que l'aile se ploie ou se déploie. Dans le premier cas, elles glissent les unes sur les autres et se couchent obliquement le long du cubitus. Dans le déploiement, au contraire, elles s'étalent en se redressant sur le cubitus auquel elles deviennent presque perpendiculaires, quand l'aile est complètement étendue.

Outre les glissements que nous venons de décrire, les rémiges ont encore la faculté de pivoter sur leur pointe. Ce mouvement change l'orientation des lames et, suivant le sens dans lequel il se fait, produit soit l'ouverture soit la clôture des fentes en forme de soupapes que laissent entre elles les rémiges.

§ 47. **Association des mouvements des rémiges avec la flexion et l'extension de l'aile.** — Soit que l'aile s'ouvre ou qu'elle se ferme, chaque rémige doit prendre sa place sans retard. Il y a, dans le déploiement comme dans le reploiement de l'aile, une série d'actes associés qui doivent s'exécuter avec une précision parfaite. Si des muscles spéciaux présidaient à chacun de ces actes, la bonne exécution de ces mouvements d'ensemble exigerait une admirable harmonie dans les actions musculaires. La Nature, dans les cas de ce genre, procède autrement : elle assure la coordination des mouvements, en la soustrayant à l'action des muscles volontaires, et en la confiant à des ligaments élastiques toujours prêts à agir avec ensemble, aussitôt que le relâchement musculaire leur permet d'entrer en jeu.

§ 48. **Ligaments élastiques des rémiges.** — Peu d'auteurs ont étudié l'anatomie de ces ligaments. C'est à Pettigrew[1], Alix[2],

1. Pettigrew, *On the Physiology of Wings* (Transact. of the Roy. soc. of Edinburgh, 1871).
2. Alix, *Essai sur l'appareil locomoteur des oiseaux*, 1874. Paris, G. Masson.

Robin et Chabry[1] qu'on en doit la description; encore, ces anatomistes sont-ils divisés sur certains points de la structure de ces organes.

Pour donner une idée de la fonction des ligaments élastiques des rémiges, reportons-nous aux détails de la construction d'un éventail, où l'on a cherché visiblement à imiter la structure de l'aile. Au-dessus de l'articulation des lames de l'éventail, et à l'origine de chacune d'elles, règne un ruban qui, adhérant à toutes les lames, les rend solidaires et en limite l'écartement dans le déploiement complet. En outre, ce ruban commande tour à tour le mouvement de chacune des lames. En effet, si on écarte la première, dès que la partie du ruban qui l'unit à la seconde est tendue, cette seconde lame suit le mouvement, puis tend la partie du ruban qui s'attache à la troisième lame, celle-ci est entraînée à son tour, et ainsi de suite, jusqu'à la dernière; l'éventail est alors entièrement ouvert.

Mais le ruban n'est pas élastique; il agit *successivement* sur la série des lames. Imaginons à sa place un lien de caoutchouc : le déplacement de la première lame se transmettra presque immédiatement à toutes les autres, et celles-ci s'écarteront toutes à la fois, de quantités croissantes, jusqu'à extension complète du caoutchouc. C'est par un mécanisme de ce genre que se produit la solidarité des rémiges sous l'influence du ligament qui en réunit les tuyaux.

Sur le bord postérieur de l'aile, règne une première bande de tissu fibro-élastique percée d'une série de trous dans chacun desquels s'engage la pointe d'une rémige. C'est un mode d'implantation flexible, destiné à permettre les mouvements de chacune de ces plumes.

Parallèlement à ce ligament, on en trouve un second qui règne aussi tout le long de l'aile, faisant suite, du côté du corps, au tendon du muscle tenseur de la membrane axillaire et se perdant, par l'autre bout, dans le périoste de la main. Ce liga-

1. Robin et Chabry, *Organes élastiques de l'aile des oiseaux* (Journ. de l'anat. et de la physiol., p. 291, 1884).

ment court sur la face inférieure ou palmaire des tuyaux des rémiges, vers le milieu de leur longueur, et contracte des adhérences avec chacun d'eux. Dans la flexion de l'aile, ce ligament revient sur lui-même par son élasticité et, entraînant toutes les rémiges secondaires, les couche le long du cubitus. Mais, dans l'extension, la main qui s'ouvre et dont le périoste adhère à l'extrémité du ligament exerce sur celui-ci une traction qui se transmet simultanément à toute la série des rémiges cubitales et qui, d'inclinées qu'elles étaient, les redresse perpendiculairement à l'os sur lequel elles sont implantées. Les rémiges cubitales et les rémiges palmaires s'étalent de cette façon, pour former par leur ensemble la surface destinée à prendre son point d'appui sur l'air.

Tout cela, avons-nous dit, s'accomplit automatiquement, sans intervention musculaire. Sur l'oiseau mort, on peut observer ces mouvements des rémiges, en ouvrant et fermant tour à tour les articulations de l'aile. On voit en outre que, dans la flexion de l'aile, les rémiges sont séparées les unes des autres en lames de persiennes, tandis que, sur l'aile étendue, ces plumes sont accolées entre elles, la courte lame de chacune s'appliquant avec force sur la large lame de la suivante. Un pivotement de la rémige s'est donc produit pendant les mouvements d'extension et de flexion de l'aile. Ce pivotement, indépendant de toute action musculaire, est encore dû au ligament élastique dont nous allons compléter la description.

Quand on dissèque la face inférieure de l'aile d'un grand oiseau, d'un Cygne par exemple, on voit (fig. 36) que le ligament élastique envoie au tuyau de chaque rémige deux expansions obliques orientées en sens inverse l'une de l'autre. De ces deux bandelettes, l'une dirigée vers la racine de la plume contourne en partie le tuyau et y prend adhérence par son extrémité; l'autre, dirigée vers l'extrémité libre de la plume, contourne le tuyau en sens contraire et y adhère aussi.

A l'inspection de la figure, on comprend que si le ligament est tiré dans un sens, l'une des séries d'expansions obliques sera tendue et l'autre détendue. En tirant le ligament en sens

contraire, on tendra les expansions obliques qui étaient détendues tout à l'heure, et inversement on détendra les autres. Or, comme ces expansions contournent le tuyau de la rémige, elles ont nécessairement pour effet de faire tourner cette plume sur son axe. Le sens de cette rotation changera suivant que le ligament sera tiré en dedans ou en dehors. Ainsi, dans le déploiement de l'aile, la traction exercée par la main de l'oiseau sur le ligament élastique fera pivoter les rémiges dans un sens; dans le reploiement de l'aile, au contraire, le ligament élastique revenant sur lui-même fera pivoter les rémiges en sens inverse.

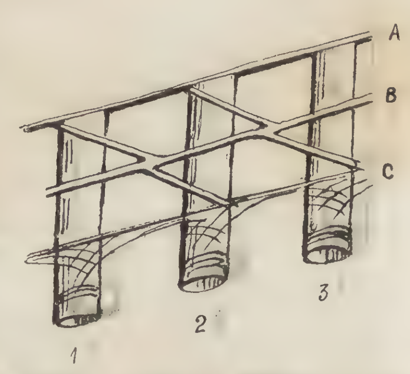


Fig. 36. — Ligaments élastiques des rémiges (d'après Pettigrew). 1, 2, 3, rémiges dont le tuyau est tronçonné. A, ligament d'implantation de la pointe des rémiges; B, ligament élastique et ses expansions obliques; C, ligaments contenus dans le repli cutané.

Il est très important, pour l'interprétation des phénomènes du vol, de savoir exactement dans quel sens pivotent les rémiges, suivant que l'aile se déploie ou se reploie. D'après Pettigrew, le sens de cette rotation est le suivant : quand l'aile se reploie, les rémiges se séparent les unes des autres et laissent entre elles des intervalles qui livrent passage à l'air; dans le déploiement de l'aile au contraire, les rémiges s'accolent entre elles. Ce qu'on observe en maniant l'aile d'un oiseau mort concorde avec la théorie de Pettigrew.

Mais tous les anatomistes ne s'accordent pas sur le sens de la rotation des rémiges. Alix soutient l'opinion contraire à celle de Pettigrew; quant à Robin et Chabry, ils se bornent à décrire ces ligaments, sans en rechercher la fonction. Il est du reste fort difficile, sur la plupart des espèces d'oiseaux, de se rendre compte par la dissection du rôle des ligaments élastiques; mais on verra que certaines expériences permettent de surprendre le mode d'action de ces organes.

§ 49. **Des couvertures.** — A la face inférieure de l'aile, s'implantent de petites plumes, dont l'axe croise obliquement celui



Fig. 37. — Couvertures inférieures de l'aile d'un Cacatoès (héliogravure).

des grandes rémiges. Ce sont les *couvertures inférieures*, dont le rôle est de fermer les espaces vides que laissent entre eux les



Fig. 38. — Couvertures supérieures de l'aile d'un Faucon (Prechtl).

tuyaux des grandes rémiges et de rendre l'aile imperméable à l'air.

La figure 37 montre la disposition des couvertures sur la face inférieure d'une aile de Cacatoès.

A la face supérieure de l'aile s'échelonnent (fig. 38) des couvertures analogues, les *couvertures supérieures* qui pressent élastiquement sur les grandes rémiges. Wunsche[1] compare leur action à celle des lames superposées d'un ressort de voiture. On doit du reste attribuer un rôle important à l'élasticité des rémiges, elle prolonge les effets de l'action musculaire à la fin de l'abaissement de l'aile. L'expérience montre que, pendant le coup d'abaissement, les rémiges se redressent par l'effet de la résistance de l'air et perdent leur courbure à concavité inférieure. En revenant à leur forme courbe, à la fin de la descente, elles continuent l'abaissement du bord postérieur de l'aile.

§ 50. **Divisions de l'aile : aile active et aile passive.** — Nous avons vu qu'on appelle *fouet* de l'aile toute la partie qui correspond aux rémiges primaires ; on nomme *éventail* la portion qui répond à la région de l'avant-bras. Ces deux régions de l'aile ont reçu de Cayley, en 1810, des désignations qui expriment bien la différence de leurs fonctions et qui, à ce titre, méritent d'être conservées. L'auteur anglais donne au fouet le nom d'*aile active*, à l'éventail celui d'*aile passive*[2], entendant par là que, dans le coup d'aile, c'est l'extrémité pourvue de fortes rémiges qui seule agit efficacement pour frapper l'air, tandis que les rémiges plus faibles de la partie interne de l'aile n'agissent que passivement, en utilisant le vent qui les frappe par leur face inférieure et en soutenant ainsi l'oiseau, à la façon d'un cerf-volant. Ignorant cette désignation de Cayley, dont les travaux n'avaient pas encore été publiés en France, je l'avais employée moi-même dans les mêmes termes[3], en la justifiant par les mêmes considérations. L'expérience montre, en effet, que dans l'abaissement de l'aile, le fouet seul subit une torsion par suite de la résistance de l'air, et accroît ainsi l'apparence hélicoïdale que la surface de l'aile

1. Wunsche, *Considérations sur le vol* (*L'Aéronaute*, 1884, p. 107).
2. Cayley, *L'Aéronaute*, 1874, p. 139.
3. Voir *La machine animale*. Paris, 1873, p. 287.

présente dans son ensemble, ce qui a pu faire croire à Pettigrew que l'aile agissait dans l'air comme une vis dans son écrou.

Je ne signalerais pas cette théorie, si l'autorité de l'éminent anatomiste qui l'a émise ne lui avait donné un certain crédit. Il est clair que l'action intermittente et alternative de l'aile ne se



Fig. 39. — Aile rameuse d'un Faucon (Prechtl).

prêterait pas au mécanisme de l'hélice, qui n'obtient la propulsion que par une rotation continue.

L'aile rameuse se termine par une pointe ; elle est formée de fortes rémiges comme chez le Faucon (fig. 39).



Fig. 40. — Aile voilière d'un Aigle (Prechtl).

L'aile voilière de l'Aigle (fig. 40) ou du Vautour est plus arrondie à sa pointe et déchiquetée, par suite de l'étroitesse et de

l'écartement des rémiges du fouet. En examinant, d'en bas, le vol d'une Corneille, on voit très bien ces intervalles entre les pennes qui s'écartent comme les doigts d'une main ouverte. Cet aspect tient à la conformation des rémiges primaires des oiseaux voiliers. Ces plumes sont rétrécies à leur pointe par des échancrures dont la figure 41, empruntée à Prechtl, montre la disposition.

Quand un Aigle ou un Vautour glisse dans l'air avec vitesse, en tenant les ailes étendues et immobiles, si l'on est placé à peu près dans le plan où plane l'oiseau, on voit l'extrémité des premières rémiges se relever en forme de crochet. Cette forme est due à la résistance de l'air qui courbe le bout des rémiges et

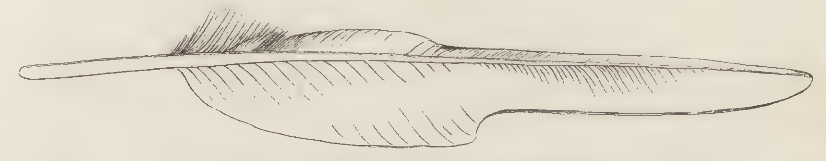


Fig. 41. — Rémige d'un Rapace voilier (Prechtl).

leur donne la forme d'un arc de cercle convexe par en bas. Du reste, les rémiges de l'aile voilière sont peu rigides ; il en résulte même, pour l'oiseau voilier, une infériorité réelle quand il doit pratiquer le vol ramé : ses coups d'ailes n'ont point la vigueur de ceux de l'oiseau rameur.

Les grands voiliers ont les ailes longues, plates, étroites et plus ou moins obtuses ; les rameurs les ont plus aigües et concaves en dessous ; du reste cette concavité varie à chaque instant, suivant que la résistance de l'air change plus ou moins la courbure des rémiges.

Entre les deux types extrêmes de l'aile voilière et de l'aile rameuse, si bien décrits par Huber, il existe une infinité de formes intermédiaires : l'aile de la Corneille, par exemple, participe du type rameur et du type voilier.

Prechtl fait remarquer avec raison que les classifications ornithologiques rapprochent souvent, les unes des autres, des espèces

qui, au point de vue de la conformation des ailes, sont très dissemblables. Le région qu'habite un oiseau et le genre d'alimentation qu'il y trouve, lui imposant des mœurs particulières, en font, suivant les cas, un rameur ou un voilier.

§ 51. **De la queue de l'oiseau.** — La queue n'a pas, au point de vue du vol, l'importance que lui avaient attribuée les premiers observateurs. Ce n'est pas, comme le croyait Aristote, un gouvernail indispensable : les oiseaux qu'on a privés de leur queue volent à peu près comme auparavant.

On a vu toutefois, à propos du vol à voile, que le Milan oriente sa queue de façons différentes, suivant le sens dans lequel le vent souffle par rapport aux orbes qu'il décrit en planant. Tous les oiseaux voiliers, d'après d'Esterno, volent en tenant la queue largement étalée. D'autre part, les oiseaux rameurs, au début de leur vol et au moment de se poser, étalent leur queue dont ils semblent se servir pour soutenir le poids de la région postérieure du corps. La queue des oiseaux semble donc constituer, tout au moins, un organe de perfectionnement pour le vol.

Le squelette de la queue est formé de vertèbres coccygiennes dont les apophyses, ainsi que les os du bassin et le fémur, donnent insertions à des muscles assez nombreux ayant pour rôle d'étaler ou de resserrer, d'élever ou d'abaisser l'éventail de douze pennes qui constitue la queue proprement dite. Ces pennes ou *rectrices* sont imbriquées à partir de la région médiane ; elles forment deux éventails symétriques dont les lames se recouvrent de dedans en dehors, de telle sorte que la lame la plus résistante ou la plus étroite de chaque rectrice soit toujours la plus externe. Des ligaments élastiques, pareils à ceux des ailes, limitent l'écartement des plumes de la queue. Chez certains oiseaux à vol rapide la queue se bifurque, et les pennes les plus extérieures peuvent acquérir un développement considérable. Mais une queue volumineuse et pesante ne se trouve que dans les espèces qui volent mal.

CHAPITRE V

CONFORMATION GÉNÉRALE DE L'OISEAU; SES DIFFÉRENTS TYPES

Classement des différents types d'oiseaux suivant leur aptitude au vol. — Influence de la conformation de l'oiseau sur sa stabilité dans l'air. — Des différentes façons dont l'oiseau corrige ses défauts d'équilibre. — Formes du corps et des ailes de l'oiseau. — Légèreté spécifique des ailes, chez les différentes espèces. — Rapport de la surface des ailes au poids de l'oiseau. — Théorie qui admet que les grandes espèces seraient incapables de voler. — Rapport du poids des muscles de l'aile à celui du corps de l'oiseau.

§ 52. **Classement des différents types d'oiseaux suivant leur aptitude au vol.** — De même que les types si nombreux des navires se distinguent entre eux par leurs qualités nautiques, de même les différents types d'oiseaux empruntent à leur conformation anatomique certaines aptitudes distinctives. Les uns sont remarquables par leur stabilité dans l'air, les autres par leur vitesse; ceux-ci, avec leurs grandes surfaces d'ailes, rappellent ces barques rapides qui portent beaucoup de toile; ceux-là, par le développement énorme de leurs muscles, sont comparables aux vaisseaux munis de machines puissantes.

Les caractères anatomiques d'un oiseau, sa conformation générale, la surface de ses ailes, le poids relatif et la forme de ses muscles, etc., tels sont les éléments d'après lesquels on peut préjuger de ses aptitudes pour tel ou tel genre de vol. A ce sujet, on trouve dans divers auteurs des renseignements du plus haut intérêt. Ces éléments épars gagneront à être réunis; ils prépareront le lecteur aux études expérimentales que nous exposerons bientôt.

§ 53. Influence de la conformation de l'oiseau sur sa stabilité dans l'air. — Les anatomistes ont insisté avec raison sur les conditions favorables que présente la conformation de l'oiseau, au point de vue de la stabilité dans l'air. L'attache des ailes se fait à la partie la plus haute du thorax, de sorte que, pendant le vol, le centre de gravité du corps se trouve le plus bas possible au-dessous du point d'appui que l'aile prend sur l'air. Si l'on observe, au moment de son essor, un Canard et surtout un Râle, on voit le corps pendre comme un sac au-dessous des ailes qui le supportent. Mais cette attitude, si favorable à la stabilité, ne s'observe pas sur les oiseaux dont le vol est rapide : l'Hirondelle, la Mouette, glissent souvent sur l'air, en abaissant la pointe de leurs ailes bien au-dessous du niveau du corps. Le vol, chez ces espèces, semble s'effectuer dans un état d'équilibre instable, où les chutes commençantes sont sans cesse corrigées par quelque habile manœuvre.

Sur une coupe transversale du corps d'un oiseau, on peut se convaincre que la superposition des divers organes se fait par ordre de densités croissantes de haut en bas. Ainsi, les poumons et les sacs aériens occupent les parties les plus hautes, tandis que l'intestin et surtout les grandes masses charnues formées par les muscles pectoraux occupent les parties inférieures du corps. C'est donc au voisinage de ces parties déclives que doit se trouver le centre de gravité.

Borellus [1] et Prechtl [2] ont cherché à assigner une position précise au centre de gravité dans le corps de l'oiseau; mais ces tentatives sont vaines, car la position de ce point change à chaque mouvement de l'oiseau par suite des déplacements de la tête, des pattes et surtout des ailes. La mobilité du centre de gra-

1. D'après Borellus, le centre de gravité du corps de l'oiseau serait situé directement au-dessous de l'attache des ailes et dans un plan vertical qui passe par le milieu du sternum.

2. Pour Prechtl, le centre de gravité de l'oiseau serait sur une ligne horizontale perpendiculaire à la droite qui joint transversalement les deux articulations des épaules, et en arrière de celle-ci, d'une quantité égale à la moitié de la largeur des ailes.

vité est une des difficultés principales que nous rencontrerons plus tard, quand il s'agira de mesurer les forces qui agissent dans le vol de l'oiseau, d'après les déplacements imprimés à la masse de son corps, et par conséquent au point central où cette masse est en quelque sorte concentrée.

Ces déplacements ont encore une grande influence sur la direction du vol, comme Léonard de Vinci l'a observé ; ils en modifient aussi la vitesse : un Héron poursuivi par un oiseau de proie allonge le cou et détale ainsi plus vite.

§ 54. **Des différentes façons dont l'oiseau corrige ses défauts d'équilibre.** — Pour rétablir son équilibre compromis, l'oiseau dispose de différents moyens. Il peut donner à l'une de ses ailes des battements plus étendus qu'à l'autre. D'autres fois, il oriente sa queue à la façon d'un gouvernail, pour corriger la direction de son vol, si elle est trop ascendante ou trop descendante. Enfin, par l'allongement ou le raccourcissement de son cou, il produit des effets analogues ; les échassiers utilisent, dans le même but, les mouvements de leurs pattes.

Ces divers moyens de changer l'inclinaison de l'axe du vol se suppléent l'un l'autre. Ainsi, les oiseaux qui ont une large queue ont en général le cou et les pattes assez courts. La queue, au contraire, est rudimentaire et peu efficace comme gouvernail chez les Palmipèdes et les Échassiers qui, les uns en tendant le cou, les autres en allongeant les jambes, élèvent ou abaissent à leur gré la direction de leur vol.

Il est surprenant de voir avec quelle vitesse interviennent ces mouvements du cou et de la queue : les actes réflexes les plus rapides en donnent à peine une idée.

Si l'on tient entre les deux mains un Pigeon, de façon que l'axe du corps soit bien horizontal, la queue se maintient aussi dans l'horizontalité. Mais qu'on vienne à relever tant soit peu la tête de l'oiseau, aussitôt sa queue se relève brusquement, parfois jusqu'à faire un angle droit avec l'axe du corps. Abaisse-t-on au contraire la tête du Pigeon, sa queue s'abaisse aussitôt et s'étale en surface. Il y a là, visiblement, production

instinctive d'actes qui, pendant le vol, auraient pour effet de corriger, comme par un coup de gouvernail, la direction ascendante ou descendante qu'on a imprimée à l'axe du corps de l'oiseau.

Si l'on répète la même expérience sur le Canard, on verra l'animal réagir par des mouvements du cou. Quand l'on élève la partie antérieure du corps, la tête s'abaisse et se porte en avant d'une manière soudaine; si au contraire on abaisse l'avant de l'oiseau, la tête se porte en arrière et se loge entre les épaules.

§ 55. **Formes du corps et des ailes de l'oiseau.** — Les ingénieurs qui construisent des carènes de navires sont arrivés à reconnaître qu'un bateau de bonne marche doit avoir non seulement l'avant de sa carène effilé et tranchant pour fendre l'eau, mais qu'il n'est pas moins indispensable de donner aux formes de l'arrière une finesse au moins égale, pour éviter les remous dont l'action est retardatrice. Les lois de la résistance au mouvement des corps dans les différents fluides sont les mêmes; aussi, la forme de l'oiseau, effilé de l'avant et surtout de l'arrière, est-elle éminemment favorable à la vitesse du vol, en réduisant considérablement la résistance de l'air[1].

Quant à l'aile qui doit, tour à tour, fendre l'air ou s'y appuyer, elle offre, dans un sens la forme de moindre résistance, dans l'autre celle de résistance maxima.

Pour fendre l'air, l'aile présente un véritable tranchant formé du bord de la membrane alaire et de celui de la première rémige carpienne. Pour s'appuyer sur l'air, elle dispose d'une surface large et légèrement concave[2] à sa face inférieure, la seule qui doive rencontrer la résistance de ce fluide.

§ 56. **Légèreté spécifique des ailes chez les différentes espèces d'oiseaux.** — Au point de vue de leur structure géné-

1. Voir au chap. XIV, *les lois de la résistance de l'air.*
2. La forme concave accroît, dans une forte proportion, la résistance qu'éprouve une surface à se mouvoir dans un fluide. Voir au chap. XIV.

rale, les ailes offrent encore une particularité intéressante : elles sont plus ou moins massives ou légères, relativement à l'étendue de leur surface. Cayley[1], qui paraît s'être occupé le premier de cette relation, cite le Héron comme type pour les ailes légères ; le Fou aurait des ailes deux fois et demie plus pesantes à égale surface. Cayley a été conduit à ces études par la préoccupation de rechercher le type le plus avantageux, pour construire des ailes mécaniques destinées à une machine volante. D'après ses calculs, une aile de 54 pieds carrés, construite sur le type *Héron*, pèserait 7 livres ; la même surface d'aile, dans le type *Fou de Bassan*, pèserait 18 livres[2].

§ 57. **Rapport de la surface des ailes au poids du corps de l'oiseau.** — Tous les oiseaux ne sont pas également bien *voilés*, comme on dit quelquefois, en employant une locution usitée dans la marine. En d'autres termes, les différentes espèces d'oiseaux sont pourvues de surfaces d'ailes très différentes, eu égard à leurs dimensions : le Canard est moins voilé que le Héron. Sur deux de ces oiseaux, dont les poids étaient à peu près égaux, la surface des ailes était dans le rapport de 1 à 2.

Mais la condition qui influe le plus sur le rapport de la surface des ailes au poids de l'oiseau, c'est la valeur absolue de ce poids : Dubochet[3] a montré le premier que si l'on compare deux

1. Cayley, *Sur la navigation aérienne* (*L'Aéronaute*, 1877, p. 179 ; traduit du *Nicholson's Journal*, 1809, vol. XXIV, p. 164).

2. Cayley aborda l'étude du vol dans un but tout à fait pratique. On avait annoncé qu'un horloger viennois, nommé Degen, venait de s'enlever dans les airs au moyen d'ailes mécaniques. Tenant la nouvelle pour certaine, Cayley entreprit de construire également un appareil capable de faire voler un homme. Dans ce but, il étudia les moteurs légers et les lois de la résistance de l'air, puis il construisit, comme l'avait déjà fait Léonard de Vinci, de grandes ailes membraneuses, légères et facilement maniables, qui trouvaient cependant sur l'air une grande résistance. Il créa l'*aéroplane*, construisit un hélicoptère semblable à celui que venaient d'imaginer Launay et Bienvenu ; enfin il fit de nombreux essais d'appareils aviateurs, dont il n'obtint que des résultats imparfaits. Mais de toutes les recherches de Cayley se dégagent d'importantes découvertes, qui ont fait progresser la théorie du vol et dont nous signalerons les principales en temps et lieu.

3. Dubochet, *Recherches sur le vol des oiseaux*. Nantes, 1834.

oiseaux de même forme, mais de taille différente, l'oiseau le plus petit aura, relativement à son poids, la plus grande surface d'ailes.

Ce fait s'explique tout naturellement par les lois de la géométrie. En effet, le poids des animaux est proportionnel au cube de leurs dimensions linéaires; leur surface n'est proportionnelle qu'au carré de ces dimensions. De sorte que si l'on compare deux oiseaux géométriquement semblables, mais dont l'un ait deux fois plus de longueur que l'autre, de bec en queue; si le plus petit de ces oiseaux pèse 1 000 grammes, le plus grand en pèsera 8 000, et si la surface d'ailes est de 3 décimètres carrés dans le petit oiseau, elle sera de 12 décimètres dans le grand. Il s'ensuit que, pour porter un poids *huit* fois plus lourd, le grand oiseau aura des ailes *quatre* fois seulement plus étendues que le petit.

Dans son remarquable travail sur le vol[1], Prechtl a tenu compte de ces relations entre la surface des ailes et le poids du corps, chez les différentes espèces[2].

Cette publication était peu connue en France, car en 1868, de Lucy[3] étonna beaucoup les adeptes de l'aviation, en annonçant que les êtres volants ont d'autant moins de surface alaire qu'ils sont plus pesants. Cette relation était déduite d'un grand nombre de mesures prises sur des animaux d'espèces et de tailles différentes[4].

1. Prechtl, *Untersuchungen über den Flug der Vögel*, Wien, 1846.

2. Dans ses calculs, Prechtl compare la racine carrée des surfaces à la racine cubique du poids; la formule est $\frac{S^{\frac{1}{2}}}{P^{\frac{1}{3}}}$, dans laquelle S correspond à la surface des ailes et P au poids de l'oiseau.

3. De Lucy, *Le vol des oiseaux*, in *Presse scientifique des deux mondes*, 1865.

4. Pour rendre la comparaison plus saisissante, de Lucy rapportait toutes ses mesures à un type idéal dont le poids serait d'un kilogramme. Ainsi, après avoir trouvé qu'un Cousin qui pèse 3 milligrammes a des ailes de 30 millimètres carrés, il concluait que dans le type Cousin le kilogramme d'animal est pourvu de 10 mètres de surface d'ailes.

Dans un tableau comparatif, de Lucy établit les relations suivantes entre

Hartings[1] a cherché, sur un assez grand nombre d'oiseaux, à déterminer le rapport de la surface des ailes au poids de l'animal; il a consigné ces mesures dans un tableau d'ensemble où il compare la racine cubique du poids à la racine carrée de la surface. Hartings obtint de cette façon un rapport[2] qui, sans être constant, ne présente plus les écarts surprenants trouvés par de Lucy, au moyen d'une méthode illogique.

J'ai moi-même dressé une liste analogue[3] en opérant sur des oiseaux de différentes espèces, tués au fusil, pesés immédiatement et soumis à la mensuration des surfaces alaires. Le rapport trouvé était à peu près le même que celui indiqué par Hartings.

Mais c'est surtout à Müllenhoff[4] qu'on doit d'importantes études

le poids et les surfaces d'ailes chez un certain nombre d'êtres volants :

Espèces.	Poids de l'animal.	Surface des ailes.	S. par 1 kil.
Canard............	3 milligr.	30 mm. c.	10 m. c.
Papillon............	20 centigr.	1663 mm. c.	8 m. 1/3
Pigeon............	290 grammes.	750 c. c.	2^m,586 c. c.
Cigogne............	2265 —	4506 c. c.	1^m,988 c. c.
Grue d'Australie...	9500 —	8543 c. c.	0^m,899 c. c.

1. Hartings, *Archives néerlandaises*, t. IV, 1869.
2. Voici le tableau donné par Hartings :

Espèces.	Poids. p	Surface. a	Rapport. $\frac{\sqrt{a}}{\sqrt[3]{p}}$
1. Larus argentatus...............	565,0	541	2,82
2. Anas nyroca..................	508,0	321	2,26
3. Fulica atra....................	495,0	262	2,05
4. Anas crecca....................	275,5	144	1,84
5. Larus ridibundus..............	197,0	331	3,13
6. Machetes pugnax...............	190,0	164	2,23
7. Rallus aquaticus...............	170,5	101	1,81
8. Turdus pilaris.................	103,4	101	2,14
9. Turdus merula..................	88,8	106	2,31
10. Sturnus vulgaris.............	86,4	85	2,09
11. Bombicilla garrula............	60,0	44	1,69
12. Alauda arvensis...............	32,2	75	2,69
13. Parus major..................	14,5	31	2,29
14. Fringilla spinus..............	10,1	25	2,33
15. Parus cæruleus...............	9,1	24	2,34

3. Voir *La machine animale*, p. 234.
4. Müllenhoff, *Die Grösse der Flugsflaschen*. Arch. de Pflüger, Bd XXX, 1884.

sur le rapport de la surface des ailes au poids du corps dans les différentes espèces d'oiseaux et d'insectes. Ce rapport varie dans certaines limites. Or, d'après ces variations, Müllenhoff a classé les êtres volants en séries dont chacune comprend des animaux d'espèces très différentes, mais qui présentent la même relation entre la surface des ailes et le poids du corps[1].

§ 58. **Théorie qui admet que les très grandes espèces d'oiseaux sont incapables de voler.** — La diminution relative de la surface des ailes quand s'accroît le poids du corps a fait croire à une infériorité des grands oiseaux au point de vue de l'aptitude au vol. Cette théorie a trouvé un appui dans l'opinion de quelques naturalistes, qui estiment qu'au delà d'une certaine taille, un

1. Après avoir réuni, dans un tableau général, les mesures correspondant à des centaines de types d'êtres volants, l'auteur adopte comme relation des surfaces aux poids l'expression suivante : $\log. \frac{S^{\frac{1}{2}}}{P^{\frac{1}{3}}} = \log. \sigma$.

Il trouve que, dans la série des êtres volants, ce rapport varie entre 0,2 et 0,7. Entre ces variations extrêmes, il établit six classes ou séries croissantes dans lesquelles trouvent place des êtres de mieux en mieux pourvus de surfaces d'ailes.

1[re] *série* (pour laquelle la valeur de log. σ est comprise entre 0,25 et 0,5). Elle comprend des animaux dont le vol est assez rapide, mais de courte durée : ce sont les moins bien pourvus, comme étendue de surface. On trouve dans cette série : des insectes, Dytique et Hydrophile, et des oiseaux, Foulque, Poule d'eau, Caille, Perdrix. Pour désigner les caractères propres à cette série par ceux d'un animal bien connu, l'auteur la rattache au *type Caille*.

2[e] *série*, log. $\sigma = 0,6$. Le vol est de plus longue durée, ce qui correspond à l'accroissement de la surface des ailes. On trouve dans ce groupe : des insectes, le Lucane, et des oiseaux, Faisan, Tétras, Paon (*type Faisan*).

3[e] *série*, log. $\sigma = 0,6$ comme dans la précédente, mais les animaux qu'elle renferme ont le vol plus rapide et plus prolongé : passereaux, Colombe égyptienne, Numenius, Bécasse (*type Moineau*).

4[e] *série*, log. $\sigma = 0,6$ comme ci-dessus. Vol encore plus rapide et plus prolongé (*type Hirondelle*).

5[e] série, log. $\sigma = 0,7$. Les oiseaux qui font partie de ce groupe présentent des temps de planements nombreux et prolongés; ils se meuvent facilement dans les airs en décrivant des cercles (*type Corneille*).

6[e] *série*, log. $\sigma = 0,8$. Les oiseaux de cette série volent à voile; le moindre souffle de vent les soutient; ils ont les ailes relativement très grandes : Milan, Vautour, Aigle (*type Vautour*).

oiseau est nécessairement incapable de voler. Ils citent à l'appui de cette thèse l'Autruche et le Casoar. Mais ne pourrait-on objecter que l'inaptitude au vol existe également chez des espèces de petite taille, le Pingouin et l'Aptéryx?

Un examen plus attentif montre que les grands oiseaux rachètent par d'autres avantages le défaut relatif d'étendue de leurs ailes. Considérons en effet un grand oiseau et un petit, donnant tous deux leur coup d'aile en un temps égal et avec la même amplitude angulaire. Chez le grand qui sera, je suppose, double du petit comme dimensions linéaires, la vitesse du bout de l'aile sera double. On sait d'ailleurs, § 57, que la surface de l'aile sera 4 fois plus grande; enfin il est généralement admis que la résistance de l'air croît sensiblement comme le carré de la vitesse. Il s'en suit que l'aile du grand oiseau trouverait sur l'air 16 fois plus de résistance que celle du petit.

Or le poids des deux oiseaux n'est que dans le rapport de 1 à 8, de sorte que le grand oiseau serait le mieux doué au point de vue de l'aptitude au vol. Mais en réalité il n'en est pas ainsi, car la fréquence des battements est sensiblement en raison inverse de la racine carrée des longueurs faites. Ainsi tend à se rétablir l'égalité d'aptitude au vol entre les oiseaux de grande ou de petite taille[1].

§ 59. **Rapport du poids des muscles de l'aile à celui du corps de l'oiseau.** — Aucun animal ne présente, annexés à son appareil locomoteur, des muscles aussi développés que ceux qui agissent sur l'aile de l'oiseau : Borellus avait déjà attiré sur ce point l'attention des naturalistes. Les mesures que j'ai prises sur un assez grand nombre d'espèces, de tailles différentes, ont donné ce résultat, que le poids des muscles pectoraux est environ 1/6 de celui de l'oiseau tout entier.

1. Il n'existe pas de loi simple qui règle les relations de la fréquence des battements par rapport à la surface des ailes. Cela tient à ce que, chez les espèces de tailles différentes, la forme des ailes varie beaucoup, et qu'à égale surface, il n'est pas indifférent que cette surface soit surtout répartie vers la pointe ou vers la base de l'aile.

Or, comme le travail dont un muscle est capable est proportionnel à son poids, on peut conclure que nulle espèce animale n'est apte à produire, pour sa locomotion, autant de travail que l'oiseau.

C'est pour cela que les aviateurs considèrent tous comme impossible que l'homme trouve dans ses muscles pectoraux assez de force pour voler, s'il réussit jamais à créer des appareils mécaniques suffisamment parfaits. Ceux qui ont admis la possibilité du vol mécanique avec les seules forces de l'homme ont supposé qu'il consacrerait du moins à ce travail les muscles de ses jambes. Léonard de Vinci[1] nous a légué sur ce point d'importantes études mécaniques. Goya, au milieu des rêves fantastiques d'un cerveau déjà hanté par la folie, a représenté, dans ses eaux-fortes, des hommes volant au moyen d'ailes artificielles qu'ils actionnent avec les jambes.

Depuis lors, dans les tentatives prématurées qui ont été faites pour adapter à l'homme des ailes mécaniques, c'est toujours aux muscles des membres inférieurs qu'on a demandé le travail nécessaire pour faire agir ces organes.

Une remarquable étude d'anatomie comparée a été faite par Legal et Reichel[2] pour déterminer, sur un grand nombre d'espèces d'oiseaux, le poids relatif des différents muscles de l'aile. Ces auteurs ont trouvé que le rapport de 1/6 entre le poids des muscles pectoraux et celui du corps représente à peu près la moyenne d'un grand nombre de pesées; mais que si l'on considère séparément les oiseaux de différents types, on trouve entre eux de grandes différences. Il y a donc des oiseaux plus ou moins bien *musclés*, de même qu'il y en a de plus ou moins bien *voilés*.

Le travail de Legal et Reichel est un important complément de celui de Müllenhoff; c'est en combinant les documents puisés à ces deux sources qu'on pourra définir les conditions mé-

1. Léonard de Vinci, Extraits publiés dans l'*Aéoronaute*.

2. Legal et Reichel, *Ueber die Beziehung der Flugmusculatur*, etc. (Aus dem anatomischen Institut zur Breslau, 1882).

caniques propres à chaque espèce d'oiseau. On aura ainsi

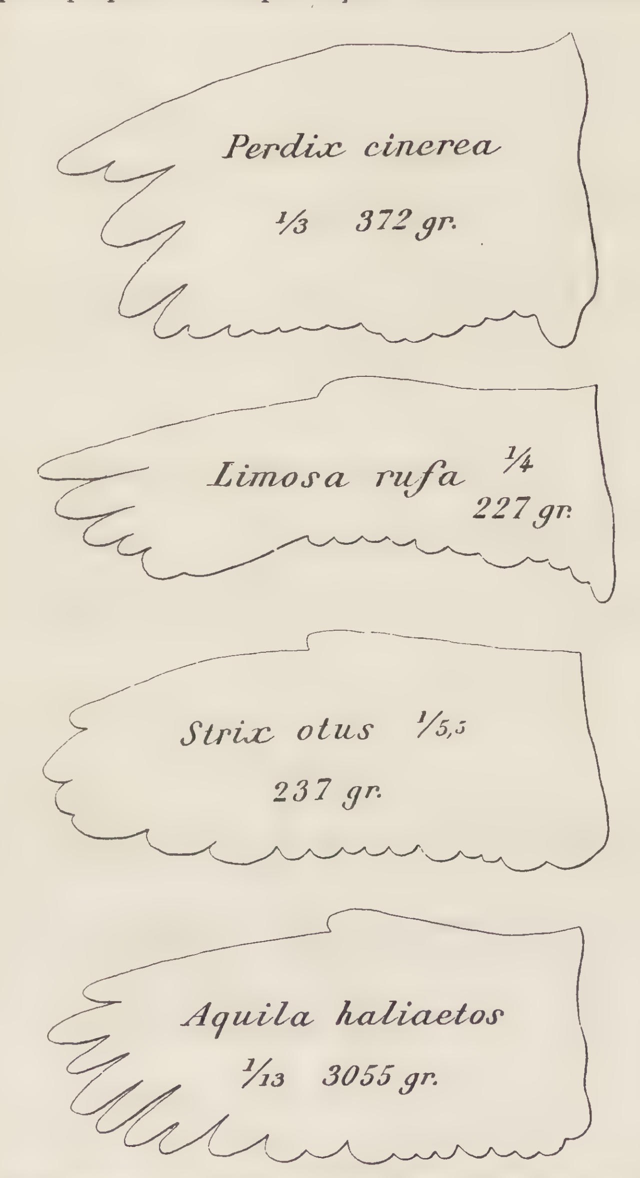


Fig. 42. — Forme et surface de l'aile chez différents oiseaux, d'après Legal et Reichel.

les éléments nécessaires pour saisir des relations entre les di-

verses conformations des oiseaux et les caractères de leur vol.

Ce qui ressort déjà clairement des études de Legal et Reichel, c'est que le rapport du poids des muscles de l'aile à celui du corps de l'oiseau change peu, si l'on compare des oiseaux d'une même classe ou même de classes voisines ; mais que, si l'on compare entre eux des types extrêmes, on trouve des écarts considérables dans le poids relatif de ces muscles.

Ainsi, le type Pigeon présente le maximum de développement des muscles pectoraux : le rapport y est le $\frac{1}{4,3}$ du poids du corps. A l'extrémité opposée de la série, se trouve le type *Larus* (Mouette), dont les pectoraux ne pèsent que $\frac{1}{10,55}$ du poids du corps.

On pourrait prévoir, d'après cet écart énorme, que le vol du Pigeon doit dépenser environ trois fois plus de travail que celui de la Mouette. Cette prévision est confirmée par l'observation de ces deux genres d'oiseaux : l'un vole toujours en battant énergiquement des ailes, tandis que l'autre pratique le vol à voile et utilise, en grande partie, la force du vent pour se soutenir dans l'air.

Les tableaux de Legal et Reichel contiennent encore d'importants documents, tels que le poids relatif des différents muscles moteurs de l'aile dans les diverses espèces d'oiseaux. On y trouve, par exemple, le moyen de comparer, au point de vue de la puissance, les élévateurs de l'aile aux abaisseurs, les muscles de l'épaule à ceux du bras.

Enfin, outre le développement des muscles, ces auteurs indiquent aussi la forme et la surface des ailes ; leurs tableaux, dont la figure 42 montre un spécimen, renferment les éléments nécessaires pour définir les conditions mécaniques du vol, dans chaque espèce d'oiseau.

DEUXIÈME PARTIE

PHYSIOLOGIE EXPÉRIMENTALE

CHAPITRE VI

PHYSIOLOGIE DE L'APPAREIL MOTEUR DE L'AILE

Action du système nerveux central sur les mouvements des ailes. — La sensibilité semble régler la fréquence des mouvements des ailes d'après la vitesse du vcl. — Solidarité des mouvements des ailes avec ceux de la respiration. — Force musculaire de l'oiseau ; sa mesure dynamométrique. — Force spécifique des muscles de l'oiseau. — Rapidité d'action des muscles de l'oiseau. — Phases de la contraction et du relâchement des muscles pectoraux dans le coup d'aile. — Types divers de la contraction des muscles pectoraux chez les différentes espèces d'oiseaux. — Direction de l'effort du muscle grand pectoral. — Fréquence des battements de l'aile dans les différentes espèces; durées relatives des périodes d'élévation et d'abaissement.

§ 60. **Action du système nerveux central sur les mouvements des ailes.** — On voit des Canards voler encore après que le cuisinier leur a tranché la tête ; un Pigeon auquel on a coupé la moelle épinière à la région supérieure du cou bat des ailes pendant longtemps, avec rapidité et énergie. Ces faits montrent bien que les centres nerveux de la moelle suffisent pour commander les mouvements du vol et même pour les coordonner.

Mais le cerveau intervient pour détruire, lorsqu'il en est besoin,

cette symétrie automatique des mouvements. L'oiseau qui veut voler à droite diminue volontairement l'amplitude des battements de l'aile droite, de sorte que l'aile gauche, progressant plus vite, dévie du côté droit l'axe du vol. C'est volontairement, et par un acte cérébral, que l'oiseau qui veut fuir un danger précipite ses coups d'ailes; qu'il ralentit au contraire et suspend ses battements, lorsqu'il se sent emporté avec trop de vitesse. Dans le vol descendant, par exemple, l'oiseau se laisse glisser sur l'air et cesse de ramer. Les rémiges, pourvues d'un appareil nerveux sensitif, paraissent fournir à l'oiseau la notion de sa propre vitesse, comme s'il en était averti par la résistance variable de l'air qu'il fend d'un mouvement plus ou moins rapide.

Tout le monde a vu que, dans leurs vols de longue durée, les grands oiseaux voyageurs, après un certain nombre de coups d'ailes, cessent parfois de ramer et glissent sur l'air pendant quelque temps; ils reprennent bientôt leurs battements pour les suspendre encore. Ces alternatives d'action et de repos des ailes semblent destinées à maintenir la vitesse à un degré sensiblement constant, ou tout au moins à l'empêcher de dépasser un *optimum* propre à chaque espèce.

§ 61. La sensibilité semble régler la fréquence des mouvements des ailes d'après la vitesse du vol. — L'expérience m'a fait voir qu'on peut à volonté accélérer, ralentir ou supprimer les battements d'ailes d'un oiseau, en lui imprimant une translation plus ou moins rapide. Voici dans quelles conditions.

Une grande règle de bois, de trois mètres de long, tourne par une de ses extrémités autour d'un pivot placé au centre d'une grande salle; l'autre extrémité de la règle est soutenue par un fil attaché au plafond verticalement au-dessus du pivot. Cela constitue une sorte de manège à l'extrémité duquel on attache un Pigeon, en lui laissant le libre mouvement de ses ailes. L'oiseau vole circulairement, en entraînant le manège; les coups d'ailes sont assez fréquents, 8 à 10 par seconde.

Augmentons la vitesse de rotation du manège, en le poussant avec la main; aussitôt la fréquence des coups d'ailes de l'oi-

seau diminue : elle tombe à 4, à 3, à 2 battements par seconde.

Pressons encore le mouvement, les ailes s'arrêtent, étendues et légèrement relevées. L'oiseau, dans l'attitude du planement, se laisse emporter dans la rotation du manège. Dès que le mouvement se ralentit, il recommence à battre des ailes; il cesse quand on donne au manège une nouvelle impulsion, reprend encore quand sa translation se ralentit. En l'absence d'une mesure précise, j'estime la vitesse qui correspond à l'arrêt des battements d'ailes à 16 ou 18 mètres par seconde. Cette expérience mériterait d'être reprise avec soin, car il y a peut-être un rapport défini entre la vitesse de l'oiseau et le nombre des coups d'ailes qu'il donne à chaque seconde.

C'est du cerveau sans doute qu'émane l'action modératrice qui règle la fréquence des mouvements d'après la vitesse de l'oiseau : une blessure à la tête le rend incapable de modérer ses coups d'ailes. On sait qu'une Perdrix, atteinte d'un grain de plomb au cerveau, se met à battre des ailes avec une extrême rapidité ; elle s'élève souvent ainsi à une grande hauteur, jusqu'à ce qu'elle retombe comme une masse.

§ 62. **Solidarité des mouvements des ailes avec ceux de la respiration.** — Tous les observateurs, depuis Galien, ont noté que certains oiseaux poussent des cris au moment où ils s'envolent. D'Esterno considère ces cris comme involontaires et pense qu'ils sont provoqués par les grands efforts que l'oiseau doit faire pour prendre son essor. Il serait bien étonnant, dit-il, que l'oiseau, si défiant à l'endroit du chasseur, se trahît volontairement par ses cris, s'il avait le pouvoir de les retenir. C'est qu'en effet les efforts énergiques des muscles pectoraux s'accompagnent d'émission d'air par la trachée[1].

1. On peut s'en convaincre par l'expérience suivante. On trachéotomise un oiseau et l'on introduit dans la trachée un tube en T qui, tout en laissant libre le passage normal de l'air pour la respiration, lui ouvre latéralement une issue que l'on met en rapport avec un appareil manométrique inscripteur. Cet appareil, auquel j'ai donné le nom de *tambour à levier**, trace

* Voir la *Méthode graphique*, p. 446. Paris, G. Masson, 1884.

La conformation de l'oiseau explique ces relations entre le battement des ailes et les mouvements respiratoires. En effet, les muscles grands pectoraux s'insèrent, d'une part, à la crête du sternum ou bréchet, et, d'autre part, à la base de l'humérus que la résistance de l'air empêche d'obéir rapidement à la traction des muscles. L'effort combiné des deux pectoraux comprimera donc la cage thoracique et expulsera par la trachée une partie de l'air contenu dans les sacs pulmonaires. Quand cette émission d'air se fait avec une certaine violence, ainsi que cela se voit dans les coups d'ailes de départ, elle donne naissance à des cris. Sur la Poule et la Perdrix, par exemple, ces cris sont saccadés et scandés exactement comme les battements des ailes.

§ 63. **Force musculaire de l'oiseau.** — On attribue généralement aux oiseaux une force extraordinaire : Borellus pensait que leurs muscles pectoraux étaient capables de soulever un poids dix mille fois plus grand que celui du corps. Buffon a écrit que le Cygne peut, d'un coup d'aile, briser la jambe d'un homme. Audubon a émis des appréciations non moins étonnantes. L'expérience devait réduire beaucoup ces estimations de la force des oiseaux.

En physiologie, quand on veut connaître la force d'un muscle, on en détache le tendon et l'on cherche quel est le poids maximum que ce muscle électrisé soulève par son raccourcissement. On trouve ainsi que, pour un même animal, les muscles sont d'autant plus forts qu'ils sont plus gros, c'est-à-dire qu'ils contiennent un plus grand nombre de fibres contractiles.

sur un cylindre tournant les émissions et aspirations de l'air; il en résulte une courbe sinueuse dont chaque ondulation correspond à un mouvement respiratoire. Un long tube de caoutchouc met la trachée de l'oiseau en communication avec le tambour inscripteur, tout en laissant au vol la possibilité de s'effectuer sur un assez long parcours. Dans l'état de repos, l'oiseau respire lentement, et le tambour à levier trace des oscillations peu fréquentes. Mais, au moment de l'essor, les courbes prennent une extrême fréquence et une grande amplitude, en rapport direct avec le nombre et l'étendue des coups d'ailes. Les ondulations du tracé diminuent d'amplitude quand le vol a pris sa vitesse habituelle; car les battements d'ailes deviennent alors moins étendus.

En mesurant ainsi la force musculaire d'une Buse, j'ai obtenu pour l'effort développé par les deux muscles grands pectoraux 12 kil. 600 grammes[1].

§ 64. **Force spécifique des muscles de l'oiseau.** — On appelle force spécifique d'un muscle, l'effort développé par un faisceau de ce muscle qui aurait 1 centimètre carré de section transversale.

Si l'on pratique sur la Buse une coupe du grand pectoral, perpendiculairement à la direction de ses fibres, on trouve que la

1. Voici comment on peut mesurer la force musculaire d'un oiseau.

S'il s'agit d'une Buse, ou de quelque oiseau de proie difficile à manier, on commence par le chaperonner, ou par lui envelopper la tête dans une étoffe opaque, ce qui a pour effet de le plonger dans la torpeur et même de supprimer chez lui toute marque de sensibilité. On couche alors l'animal sur le dos, au bord d'une table, de façon que l'une des ailes puisse être étendue en dehors de la table. L'autre aile est chargée d'un sac de grenaille de plomb qui l'immobilise.

L'aile restée libre étant étendue en dehors de la table, on y accroche, au niveau de l'extrémité cubitale de l'humérus, un plateau de balance dans lequel un aide verse graduellement de la grenaille de plomb; en même temps, on électrise les muscles pectoraux avec des courants d'une machine d'induction. Aussitôt que l'équilibre est établi entre le poids soutenu et l'effort du muscle contracté, on arrête l'expérience. Dans une mesure de la force musculaire de la Buse, le poids soutenu était de $2^{k},390^{gr}$.

L'équilibre obtenu dans l'expérience qui vient d'être décrite est tout à fait comparable à celui qui s'établit dans une balance romaine, entre l'objet pesé et le poids appliqué sur un bras de levier plus ou moins long. En effet, la force du muscle grand pectoral agit sur l'humérus, très près de l'articulation de l'épaule; le poids qui équilibre cette force est au contraire placé tout au bout de l'humérus. Pour connaître la valeur du bras de levier de ces deux forces, il faut, après avoir sacrifié l'oiseau, déterminer par la dissection le lieu où s'insère le grand pectoral, et la distance qui sépare son insertion du centre de mouvement de l'articulation de l'épaule.

Si l'on tient compte de l'étendue de l'insertion du grand pectoral sur l'humérus et de l'obliquité des fibres de ce muscle, on trouve que chez la Buse son effort s'applique à 17 millimètres environ du centre de mouvement de l'épaule. Quant au poids soutenu par la contraction musculaire, il était appliqué sur l'humérus à 90 millimètres du centre de l'articulation.

La force totale du grand pectoral avait donc pour valeur :

$$F = \frac{2\,390 \times 90}{17} = 12 \text{ kilogr. } 600 \text{ gr.}$$

On peut toutefois objecter à ces expériences, que les contractions arti-

surface de section est de $9^{cc},7$. En divisant par ce nombre les 12 600 grammes que le muscle est capable de soulever, on trouve, pour l'effort développé par chaque faisceau dont la section serait d'un centimètre carré : 1 kil. 298 grammes.

En opérant de la même manière sur un Pigeon, j'ai obtenu pour la force spécifique : 1 kil. 400, chiffre un peu plus élevé.

La force spécifique présente dans les diverses espèces d'animaux des valeurs inégales. Ces différences sont tout à fait comparables à celles qui existent dans certaines machines, relativement à la tension de vapeur sous laquelle elles fonctionnent.

Les machines à *basse* ou à *haute* pression pourraient être désignées sous les noms de machines à *petite* ou à *grande force spécifique :* les premières ne soulevant guère plus d'un kilogramme pour chaque centimètre carré de la surface de leur piston, tandis que les autres soulèvent 10 ou 20 kil., si la tension de la vapeur y est portée à 10 ou 20 atmosphères.

Les muscles des oiseaux seraient assimilables aux moteurs à basse pression, puisqu'ils ne développent guère plus d'un kilogramme par centimètre carré. Au point de vue de la force spécifique de leurs muscles, les oiseaux ne sont pas supérieurs aux mammifères. Mais il ne faudrait pas en conclure que l'homme serait capable de voler comme l'oiseau avec la seule puissance de ses muscles. On a vu en effet, § 48, que l'oiseau l'emporte sur tous les autres vertébrés pour le volume et par conséquent pour la force relative des muscles de ses membres antérieurs.

§ 65. **Rapidité d'action des muscles de l'oiseau.** — On admet que la résistance de l'air contre une surface qui se déplace croît sensiblement comme le carré de la vitesse du mouvement com-

ficiellement provoquées par l'électricité dans les muscles ne sont pas nécessairement de même force que celles que la volonté commande dans les conditions normales du vol. C'est pourquoi j'ai recouru à une autre sorte de mesure dont il sera question plus loin, et dans laquelle les forces sont estimées d'après les vitesses qu'elles impriment à la masse de l'oiseau pendant le vol.

muniqué à cette surface. L'aile doit donc frapper l'air avec vitesse, pour y trouver la résistance qui sert de point d'appui au vol, et il ne servirait de rien à l'oiseau d'avoir des muscles capables d'efforts considérables, si ces muscles n'avaient, en même temps, une grande rapidité d'action.

La durée et les phases des actes musculaires se mesurent par la Myographie[1], c'est-à-dire en inscrivant sur un cylindre tournant les mouvements communiqués par un muscle à un style traceur. Or, en inscrivant comparativement les mouvements de muscles de différents animaux, on trouve que les oiseaux ont des actions musculaires beaucoup plus rapides que les autres vertébrés[2].

1. Voir la *Méthode graphique*, p. 507.

2. Sans entrer dans le détail des expériences myographiques, nous représenterons seulement, dans la figure 43, quelques tracés du myographe, afin de montrer comment se traduisent en courbes l'*amplitude*, la *durée* et les *phases* des mouvements enregistrés par un muscle qui se contracte, puis se relâche.



Fig. 43. — Tracés myographiques produits par trois mouvements d'intensités et de phases différentes.

Les courbes 1, 2, 3 correspondent à trois mouvements différents, successivement inscrits sur un cylindre qui tournait uniformément.

L'*étendue* du mouvement est indiquée par la hauteur comptée verticalement (ou sur l'axe des ordonnées), de sorte que la courbe 1 correspond au mouvement le plus étendu, la courbe 3 à celui dont l'amplitude est la plus faible.

La *durée* du mouvement est exprimée par la longueur de la courbe, comptée horizontalement (ou sur l'axe des abscisses); elle est courte dans la première courbe, et de plus en plus grande dans les suivantes.

Les *phases* du mouvement se traduisent par la pente plus ou moins inclinée des différents éléments de la courbe. Ainsi, dans le n° 1, le soulè-

La Tortue, au contraire, a des mouvements très lents : quand on excite un de ses muscles, il met plus d'une seconde à accomplir son raccourcissement, de sorte que ces deux vertébrés, la Tortue et l'Oiseau, si voisins l'un de l'autre par leurs affinités zoologiques, occupent des rangs extrêmes dans la série des vertébrés, si on les classe au point de vue de la rapidité d'action de leurs muscles.

§ 66. **Phases de la contraction et du relâchement des muscles pectoraux dans le coup d'aile.** — On raconte que Milon de Crotone, s'entourant la tête d'une corde serrée, la brisait en rapprochant violemment les mâchoires, c'est-à-dire en contractant ses muscles temporaux. C'était le gonflement des muscles contractés qui tendait et brisait la corde. Vraie ou fausse, cette légende correspond à un fait réel, c'est qu'un muscle renfermé dans une ligature inextensible exerce sur elle un effort d'autant plus violent qu'il se contracte avec plus d'énergie. Et si, entre le muscle et l'enveloppe, on introduit un appareil *dynamographique*, celui-ci pourra traduire l'énergie de la contraction avec ses différentes phases. C'est d'après ce principe que j'ai inscrit les phases de la contraction et du relâchement des muscles pectoraux d'un Pigeon pendant les battements de ses ailes.

Chacun peut apprécier sur soi-même le durcissement et le gonflement du muscle biceps en contraction. Les muscles pectoraux de l'oiseau subissent des phénomènes semblables chaque fois qu'ils se contractent pour abaisser l'aile. C'est ce gonflement qu'il s'agit de transmettre à un appareil inscripteur ; il traduira, avec toutes ses phases, les variations de la force

vement de la courbe est brusque; il est lent dans les deux autres. Enfin puisque la phase ascendante de chacune de ces courbes correspond au raccourcissement du muscle, on reconnaît, au premier coup d'œil, que les trois muscles avaient des raccourcissements, d'intensité, de brusquerie et de durée très inégales.

C'est par cette méthode qu'on a constaté que le muscle pectoral des oiseaux se raccourcit plus brusquement que les muscles des autres vertébrés dont les mouvements ont été étudiés par la myographie.

motrice pendant le coup d'aile. Voici comment se fait l'expérience.

Un Pigeon est revêtu d'une sorte de corset à l'intérieur duquel on glisse, en face de l'un des muscles pectoraux, une *capsule dynamométrique*[1] sur laquelle agiront les changements qui surviendront dans les dimensions transversales du muscle. Un tube de caoutchouc, d'une dizaine de mètres de longueur, met cette capsule manométrique en rapport avec un tambour inscripteur.

La figure 45 montre la disposition de l'expérience, dans laquelle l'oiseau peut voler sur un parcours d'une quinzaine de mètres, sans cesser d'être en communication constante avec l'enregisteur. A la fin du vol, on trouve inscrites sur le cylindre une série de courbes à retours périodiques très réguliers, figure 46, ligne inférieure.

On peut affirmer d'avance que la partie la plus haute de ces courbes correspond à la phase d'abaissement de l'aile, puisque l'élévation de la courbe exprime le gonflement, c'est-à-dire le

1. Cette capsule est ainsi formée (fig. 44). Une petite cuvette de métal contenant à son intérieur un ressort à boudin est fermée par une membrane de caoutchouc. Le ressort intérieur tend à soulever la membrane et presse la surface du muscle exploré. Un tube de caoutchouc met l'intérieur de la

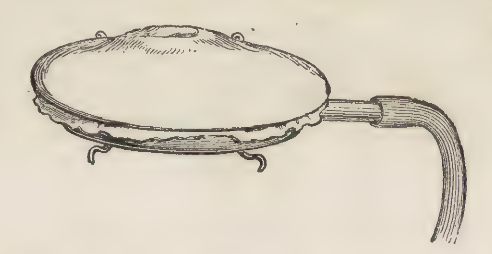


Fig. 44. — Capsule manométrique pour explorer les changements de forme des muscles qui se contractent.

capsule en communication avec le tambour inscripteur. Quatre griffes, situées autour de la capsule, la font adhérer au corset et l'empêchent de se déplacer par l'effet des mouvements de l'oiseau.

Les changements d'épaisseur du muscle font que le ressort à boudin le déprime pendant le relâchement, tandis que ce ressort est repoussé quand le muscle durcit en se contractant. Il en résulte des mouvements d'air qui se transmettent de la capsule au levier inscripteur, et réciproquement.

raccourcissement du muscle abaisseur. Mais il était plus sûr de s'assurer de cette correspondance par une expérience directe.

La chronographie électrique servit à inscrire, en même temps que la courbe myographique, les débuts des élévations et des abaissements de l'aile[1].



Fig. 45. — Pigeon portant l'appareil myographique et le chronographe électrique.

Les deux tracés sont réunis dans la figure 46 qui montre qu'en effet le gonflement maximum du muscle grand pectoral correspond à la fin de l'abaissement de l'aile, instant où il est raccourci

1. Une sorte de petite languette, mise en mouvement par la résistance de l'air, fut placée à l'extrémité de l'aile. Cette languette, en se déplaçant, ouvrait et fermait tour à tour un circuit électrique, suivant que l'aile de l'oiseau commençait à monter ou à descendre. Sur le trajet du circuit un *signal électro-magnétique* (voir la *Méthode graphique*, p. 475) traçait ses indications sur le cylindre par sa pointe située exactement au-dessous de celle du tambour myographique.

au maximum. Cette figure montre aussi que le raccourcissement du grand pectoral, et par suite l'abaissement de l'aile, ne se fait pas avec une force constante, mais présente des phases assez compliquées sur lesquelles nous n'insisterons pas ici [1].

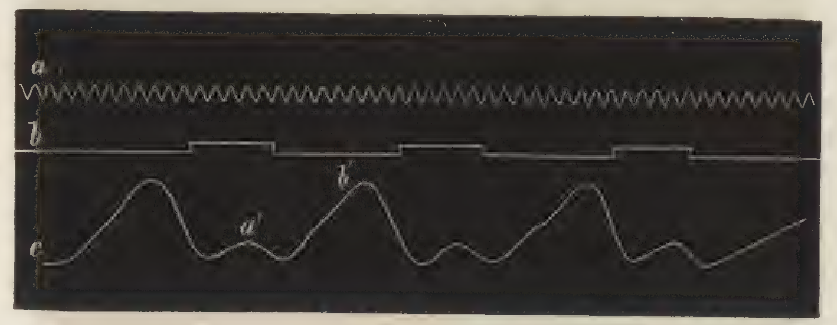


Fig. 46. — Tracés superposés des phases de la contraction des muscles pectoraux (ligne *c*), et des phases d'élévation ou d'abaissement de l'aile (ligne *b*). En *a*, tracé d'un diapason de 100 vibrations doubles, destiné à mesurer la durée de chacun de ces actes enregistrés simultanément.

§ 67. **Types divers de la contraction des muscles pectoraux chez les différentes espèces d'oiseaux.** — En opérant de la même manière sur différentes espèces d'oiseaux, on obtient des tracés de formes variées qui prouvent que l'acte musculaire n'a pas, chez tous, la même intensité ni les mêmes phases (fig. 47).

Toutefois, dans chacun des tracés I, II, III, IV, V, on observe le retour périodique de deux ondulations parfaitement reconnaissables *a* et *b*, qui se reproduisent à chaque battement complet, ou *révolution* de l'aile : l'ondulation *a* correspond à l'élévation; l'ondulation *b*, à l'abaissement de l'aile [2].

1. Voir, pour les détails de ces expériences, Marey, *Mémoires sur le vol des insectes et des oiseaux*. Bibliothèque des Hautes-Études, 1869.

2. C'est en contrôlant par l'inscription électrique le sens des mouvements de l'aile, qu'on reconnaît que l'ondulation *a'* correspond exactement au temps d'élévation, l'ondulation *b'* au temps d'abaissement.

L'explication de ce redoublement de la courbe musculaire est assez délicate.

J'ai supposé d'abord que l'ondulation *b'* était due à l'action de l'abaisseur de l'aile, tandis que *a'* serait produite par le releveur. L'expérience semble confirmer cette supposition.

En effet, comme les muscles grand et moyen pectoral ne sont pas de

§ 68. **Direction de l'effort du muscle grand pectoral.** — Si l'on considère la structure du grand pectoral de l'oiseau, on voit que ses fibres, partant de l'humérus, divergent pour se rendre aux

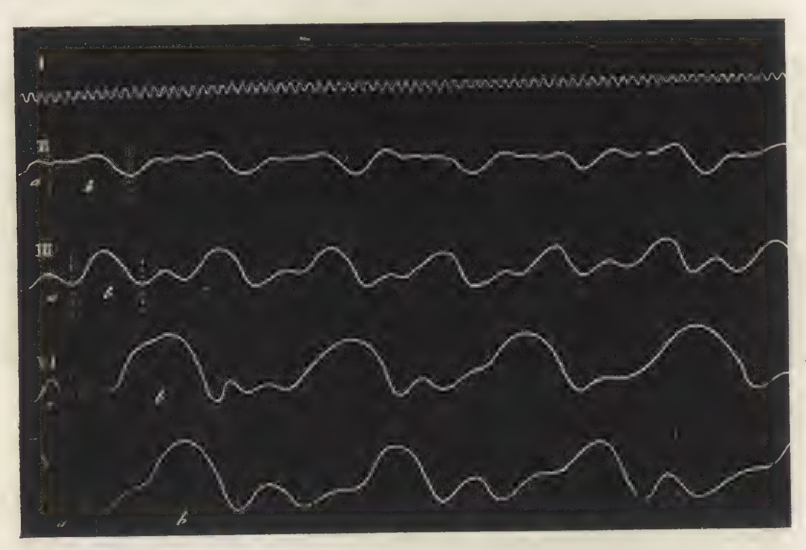


Fig. 47. — Types divers de la contraction des muscles pectoraux chez différents oiseaux ; la durée des phases se mesure d'après le tracé du diapason, ligne I. — Ligne II, tracé des muscles du Pigeon ; III, muscles du Canard ; IV, du Buzard ; V, de la Buse. — Dans tous ces tracés l'ondulation *a* correspond à l'élévation de l'aile, l'ondulation *b* à l'abaissement.

fosses sternales où elles s'insèrent. Or, si l'on cherche la direction moyenne de ces fibres rapportée à l'attitude de l'oiseau dans le

même étendue, il s'ensuit que, dans certaines régions de la fosse sternale, l'application de la capsule dynamométrique ne devra pas subir les effets du gonflement du moyen pectoral. Cela arrive si la capsule est appliquée dans la région externe des masses musculaires. Le tracé qu'on prend de cette manière ne donne qu'une ondulation, celle qui correspond au grand pectoral ou abaisseur de l'aile.

D'autre part, l'inégale importance des ondulations *a* et *b* chez les différentes espèces paraît s'expliquer par l'inégal développement que présente le muscle élévateur de l'aile chez les rameurs et chez les voiliers, ce muscle étant plus développé chez les premiers que chez les seconds.

Tatin (*Travaux de mon laboratoire*, t. III, p. 300) a émis sur l'origine de ces deux ondulations une hypothèse ingénieuse : il attribue la plus forte à la contraction active du grand pectoral dans l'abaissement de l'aile, la plus faible à l'effort résistant du même muscle quand le vent relatif produit par la vitesse de l'oiseau fait remonter l'aile (voir au chap. XVII).

vol, on trouve qu'elle s'approche beaucoup plus de l'horizontale que de la verticale [1]. De sorte qne, si l'action totale du faisceau est décomposée en deux forces, dont l'une soit horizontale et l'autre verticale, la première l'emporte de beaucoup sur la seconde [2].

Si l'on compare des oiseaux de différents types, au point de vue de la direction moyenne des fibres du grand pectoral, on trouve des différences très grandes. Tout porte à croire que la direction de l'effort du grand pectoral est en rapport avec le genre de vol propre à chaque espèce. D'une manière générale, les rameurs ont les fibres du grand pectoral plus obliques, tandis que chez les voiliers ces fibres se rapprochent davantage de la verticalité. Ces particularités ont une très grande importance au point de vue du mécanisme du vol ; il en sera de nouveau question plus loin.

§ 69. Fréquence des battements de l'aile dans les différentes espèces. — On a vu § 20 que l'observation directe permet de compter les coups d'ailes sur les grandes espèces d'oiseaux, qui ne donnent que de rares battements. Mais, sur les petites espèces, l'œil ne peut suivre les mouvements de l'aile ; aussi la myographie est-elle un précieux moyen pour déterminer rigoureusement cette fréquence [3].

1. Marey, *Note sur les valeurs relatives des deux composantes de la force dépensée dans le coup d'aile de l'oiseau, déduites de la direction et de l'insertion des fibres du grand pectoral*, Acad. des sciences, 1er oct. 1888.

2. On pourrait peut-être exprimer la relation de ces deux composantes entre elles au moyen de la construction suivante. On chercherait le centre de la surface d'insertion du grand pectoral au sternum et l'on joindrait ce point au centre de l'insertion de ce muscle à l'humérus; on verrait alors l'angle que fait cette ligne avec la verticale et avec l'horizontale lorsque le corps de l'oiseau est placé dans la position qu'il occupe pendant le vol.

3. Pour rendre plus précise l'estimation du temps, dans les courbes myographiques, on fait inscrire sur le cylindre les vibrations d'un diapason, comme dans la figure 46. Si le diapason vibre 100 fois par seconde, en prenant au compas la longueur de la courbe du phénomène à mesurer, et en portant cette longueur sur le tracé du diapason, on obtiendra la durée de ce phénomène, en centièmes de seconde, d'après le nombre des vibrations entières contenues dans l'ouverture du compas. La précision pourrait même

Voici les mesures obtenues sur quelques espèces d'oiseaux :

	Nombre des coups d'ailes par seconde.
Moineau	13
Canard	9
Pigeon	8
Busard	5 3/4
Chouette effraie	5
Buse	3

§ 70. **Durées relatives des périodes d'élévation et d'abaissement.** — Au point de vue absolu, ces mesures ont peu de valeur puisque, sous maintes influences, l'oiseau change la fréquence des battements de ses ailes. Mais la méthode graphique a justement l'avantage de mesurer exactement les effets de ces influences. Elle montre, par exemple, qu'au moment de l'essor, les battements des ailes sont un peu plus rares qu'en plein vol;

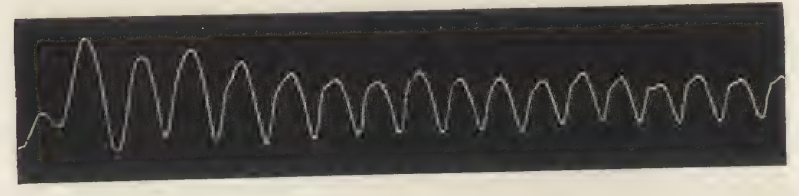


Fig. 48. — Différences d'amplitude et de fréquence des coups d'ailes d'un Pigeon, à l'essor et dans le plein vol. L'oiseau vole de gauche à droite.

mais alors l'oiseau rachète cette moindre fréquence par une plus grande amplitude, ainsi que le montre la figure 48.

Cette fréquence des coups d'ailes augmente quand l'oiseau porte une surcharge ; on s'en assure en lui appliquant sur le dos des lames de plomb plus ou moins épaisses qu'on y fixe avec des liens élastiques et peu serrés. Un Pigeon peut porter ainsi 60 grammes, une Buse plus de 100 grammes, sans cesser de voler dans un plan horizontal. Ces expériences mériteraient d'être

être poussée beaucoup plus loin, car la longueur d'une vibration du diapason correspond à un centième de seconde et, divisée en 10 parties, donnerait le millième de seconde.

répétées sur un grand nombre d'espèces, car elles sont importantes pour la mesure du travail dépensé dans le vol.

La durée relative des phases d'élévation et d'abaissement de l'aile s'obtient aussi par la chronographie électrique[1]. Contrairement à l'opinion émise par certains auteurs, la durée de l'abaissement de l'aile est en général plus longue que celle de l'élévation[2]. L'inégalité de ces deux périodes est surtout marquée chez les oiseaux dont les ailes ont une grande surface et qui donnent des battements peu fréquents. Ainsi, tandis que ces durées sont presque égales pour le Canard, dont les ailes sont très étroites et battent très vite, elles sont déjà inégales chez le Pigeon, et bien plus encore chez la Buse. Voici, en soixantièmes de secondes, les durées de ces deux périodes :

Espèce de l'oiseau.	Durée totale d'un coup d'aile.	Montée.	Descente.
Canard..........	6 2/3	3	3 2/3
Pigeon..........	7 1/2	3	4 1/2
Buse............	21 1/2	8 1/2	13

1. Voir *La Méthode graphique*, p. 456.
2. Des vues théoriques avaient conduit Cagniard de Latour à admettre que l'aile doit remonter lentement et s'abaisser très vite, afin de trouver sur l'air peu de résistance dans un sens et beaucoup dans l'autre. Cependant Liais dit avoir observé que, dans le vol de la Frégate, l'abaissement de l'aile est 5 fois plus rapide que la remontée.

CHAPITRE VII

DÉTERMINATION GRAPHIQUE DES MOUVEMENTS DE L'AILE DE L'OISEAU

Applications de la méthode graphique à l'inscription de mouvements plus ou moins compliqués. — Transmission et inscription d'un mouvement de va-et-vient suivant une droite : application aux mouvements d'élévation et d'abaissement de l'aile. — Transmission et inscription pantographiques d'un mouvement quelconque ayant lieu dans un plan : application à la trajectoire qu'un point de l'aile d'un oiseau décrit autour de l'articulation de l'épaule. — Inscriptions séparées des mouvements de l'aile dans le sens vertical et dans le sens horizontal; reconstitution de la trajectoire de l'aile au moyen des deux courbes ainsi obtenues.

§ 71. Applications de la méthode graphique à l'inscription de mouvements plus ou moins compliqués. — La plupart des mouvements de la locomotion animale, et surtout ceux du vol des oiseaux, sont inaccessibles à l'observation, à cause de leur rapidité et de leur complexité trop grandes. J'ai imaginé divers instruments pour recueillir ces mouvements, pour les transmettre à distance, enfin pour les tracer sous forme de courbes qui en traduisent toutes les phases.

On ne peut donner ici qu'un aperçu sommaire des ressources de la méthode graphique et du fonctionnement des appareils inscripteurs; ceux-ci varient naturellement suivant le degré de complication du phénomène qu'il s'agit d'inscrire[1].

Dans les mouvements du vol des oiseaux se trouvent presque tous les degrés possibles de complication. On y observe de simples mouvements de va-et-vient, tels que les élévations et les

1. Voir *La Méthode graphique*, quatrième partie, chap. II.

abaissements alternatifs des ailes, ou bien leur déplacement dans le sens horizontal.

D'autres fois, c'est une trajectoire qu'il s'agit de déterminer : genre de mouvements comparable à ceux qu'exécute la pointe d'une plume qui trace sur le papier les figures les plus variées. Les mouvements de la pointe de l'aile autour de l'articulation de l'épaule offrent toutefois cette particularité, qu'ils ne se passent pas dans un plan, comme ceux d'une plume qui écrit sur du papier ; ils ne s'effectuent pas non plus sur la surface d'une sphère qui aurait pour rayon la longueur de l'aile, car, dans son mouvement périodique, l'aile se ploie et se déploie, changeant ainsi de longueur à chaque instant. Mais s'il est difficile de déterminer la vraie trajectoire de l'aile, avec ses inflexions suivant les trois dimensions de l'espace, il est relativement facile d'inscrire fidèlement la projection de cette trajectoire sur un plan. C'est ce qu'on obtient avec le *pantographe à transmission* qui sera décrit tout à l'heure.

Les difficultés s'accroissent encore quand on doit inscrire un mouvement dont les inflexions se produisent suivant les trois dimensions de l'espace, ou bien quand on veut déterminer les rapports que présentent entre eux plusieurs phénomènes différents : ainsi, quand nous aurons à mesurer la torsion de l'aile de l'oiseau aux divers instants de ses déplacements verticaux ou horizontaux.

Enfin, une autre difficulté se rencontre quand on veut apprécier les mouvements de l'oiseau dans l'espace, ses accélérations et ses ralentissements par exemple, au lieu des mouvements d'une des parties du corps par rapport aux autres.

Toutes ces applications de la méthode graphique seront décrites sommairement, à propos de chacun des mouvements qu'elles ont servi à déterminer.

§ 72. **Transmission et inscription d'un mouvement de va-et-vient suivant une droite : application aux mouvements d'élévation et d'abaissement de l'aile.** — C'est au moyen de tubes à air que se fait cette transmission. Deux tambours à levier, sortes

de petites pompes à air (fig. 49), sont réunis entre eux par un tube flexible. Le premier de ces tambours est actionné par le

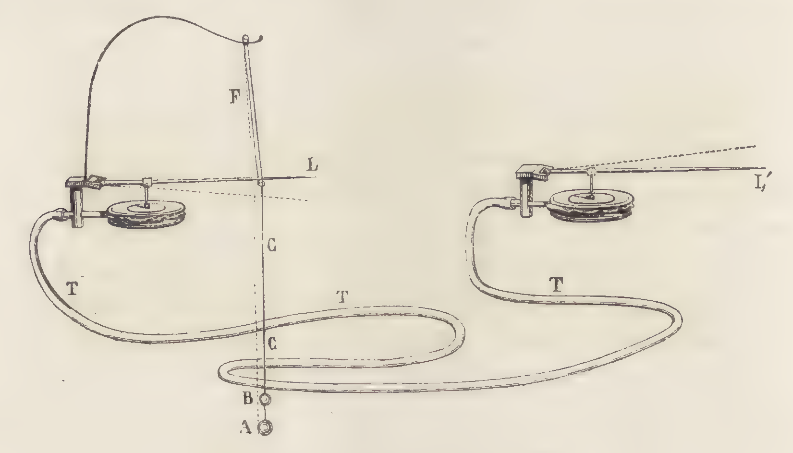


Fig. 49. — Tambours à leviers conjugués.

mouvement de l'aile de l'oiseau, tandis que le second agit sur le levier inscripteur[1].

1. Soient (fig.49), deux tambours à levier conjugués, c'est-à-dire deux capsules métalliques, ayant l'une de leurs faces formée par une membrane de caoutchouc tendue comme la peau d'un tambour. Deux leviers, L et L', articulés par une de leurs extrémités à un axe autour duquel ils peuvent osciller verticalement, sont reliés, chacun, à un disque collé sur la membrane d'un tambour. Les deux capsules communiquent entre elles par un long tube de caoutchouc. Il est clair que si l'on fait mouvoir le levier L, les enfoncements et les soulèvements alternatifs que subira la membrane de son tambour comprimeront et raréfieront tour à tour l'air qui y est contenu ; or, comme ce tambour communique avec l'autre au moyen du tube, les mouvements imprimés au levier L seront répétés par le levier L'. Toutefois, cette répétition du mouvement se fera en sens inverse : de telle sorte, que l'abaissement du premier levier produira une élévation du second, et réciproquement.

Si le mouvement à étudier est communiqué au levier L, celui-ci s'appellera l'*explorateur*. L' sera le *récepteur*, chargé d'inscrire les phases du mouvement ; son extrémité, munie d'une pointe, tracera les indications sur un cylindre noirci à la fumée et tournant d'un mouvement uniforme connu.

Pour communiquer au levier L le mouvement d'un point, on n'a qu'à relier ce point au levier du tambour explorateur au moyen d'un fil, tandis qu'un ressort de rappel tire sur le levier en sens inverse. C'est la disposi-

La figure 50 est la courbe des oscillations verticales de l'aile d'un Pigeon; elle se lit comme l'écriture ordinaire et montre : d'abord une phase ascendante de l'aile, BH, puis une phase descendante. La forme arrondie de cette courbe, à ses inflexions

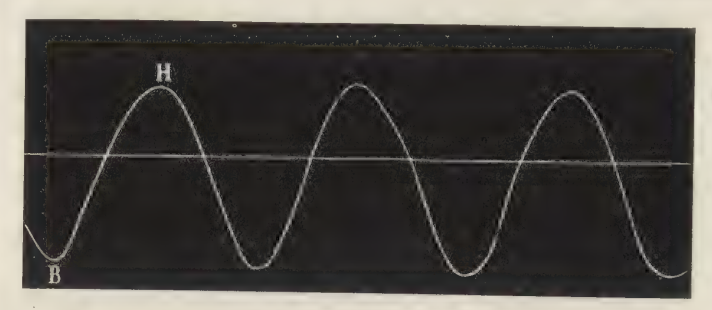


Fig. 50. — Tracé des élévations et abaissements de l'aile d'un Pigeon.

extrêmes, montre que le mouvement de l'aile est ralenti chaque fois qu'il change de direction. Enfin, sur cette courbe comme sur celles qu'ont données les différentes espèces d'oiseaux, la phase ascendante du coup d'aile a une durée un peu moindre que la phase descendante.

§ 73. **Transmission et inscription pantographiques d'un mouvement quelconque ayant lieu dans un plan.** — Tout mouvement qui se passe dans un plan peut être considéré comme engendré par deux mouvements de va-et-vient perpendiculaires

tion qui a servi à inscrire les oscillations alternatives des ailes de différentes espèces d'oiseaux.

Voici les détails de cette transmission. Soit (fig. 49), une boule de métal qui oscille entre les positions A et B, et dont on veuille inscrire les mouvements. Un fil de soie relie cette boule au levier L ; celui-ci, à son tour, est relié à une potence fixe, par une bandelette de caoutchouc F. Quand la boule passera de B en A, elle tirera le levier et allongera la bandelette de caoutchouc ; quand la boule repassera de A en B, la bandelette élastique ramènera le levier à sa position première et le fil restera toujours tendu. Pendant que les mouvements de la boule feront osciller le levier explorateur L, le levier récepteur L' oscillera suivant les mêmes phases, mais en sens inverse.

Enfin, si l'on veut que les oscillations des deux leviers soient de même sens, il suffira de renverser l'un des tambours, le récepteur par exemple.

entre eux. C'est ce principe de cinématique qui sert de base à la méthode de Lissajous, c'est-à-dire à la formation de figures géométriques au moyen de vibrations de diapasons rectangulairement combinées. C'est également sur ce principe qu'est fondée la construction de l'appareil qui m'a servi à inscrire les mouvements de l'aile autour de l'articulation de l'épaule.

L'appareil est représenté dans la figure 51 : c'est une sorte de pantographe[1] qui, au moyen de tubes à air, transmet à un *levier inscripteur* les mouvements de sens divers qu'on imprime à un *levier manipulateur*.

Ainsi, en imprimant au premier levier, comme on le ferait à

1. Sur deux supports verticaux solidement enfoncés dans des pieds de fonte sont fixés deux leviers horizontaux qui devront, grâce aux moyens de transmission que nous allons décrire, exécuter tous deux les mêmes mouvements. Chacun de ces leviers est monté sur un joint de Cardan, c'est-à-dire sur une double articulation qui lui permet de se mouvoir dans tous les sens : ainsi, chaque levier peut être porté en haut, en bas, à droite, à gauche, et décrire par sa pointe la base d'un cône dont le Cardan sera le sommet; enfin, il exécutera tous les mouvements qu'il plaira à l'expérimentateur de lui imprimer. Pour transmettre les mouvements d'un levier à l'autre, on se servira du procédé que le lecteur connaît déjà, c'est-à-dire des tambours et des tubes à air.

Le levier, qui dans la figure 51 se voit à gauche, est relié, par une tige métallique verticale, à la membrane d'un tambour placé au-dessous de lui. Dans les mouvements verticaux du levier, la membrane de ce tambour, tour à tour abaissée ou soulevée, produira une soufflerie qui actionnera le levier de droite par un deuxième tambour situé au-dessus de ce levier.

Grâce à sa position renversée, le tambour 1', qui agit sur le levier inscripteur, lui communique des mouvements de même sens que ceux qu'exécute le levier du tambour 1.

Supposons, en effet, qu'on abaisse le levier manipulateur, cela produit l'enfoncement de la membrane du tambour 1 ; il s'ensuit une soufflerie qui gonfle la membrane du tambour 1' et par conséquent abaisse le levier inscripteur. Inversement, l'élévation du levier manipulateur produit une aspiration d'air qui élève la membrane et le levier récepteurs.

La même disposition préside à la transmission du mouvement dans le plan horizontal : on place, à droite de l'un des leviers et à gauche de l'autre, les tambours conjugués 2 et 2', en disposant verticalement le plan de leurs membranes. Les mouvements de latéralité se transmettent de même que les mouvements verticaux au moyen de tubes à air.

une plume, les mouvements qui tracent une lettre ou un mot, cette lettre ou ce mot sont inscrits par le levier récepteur.

La pointe du levier traceur décrit, autour d'un joint de Cardan

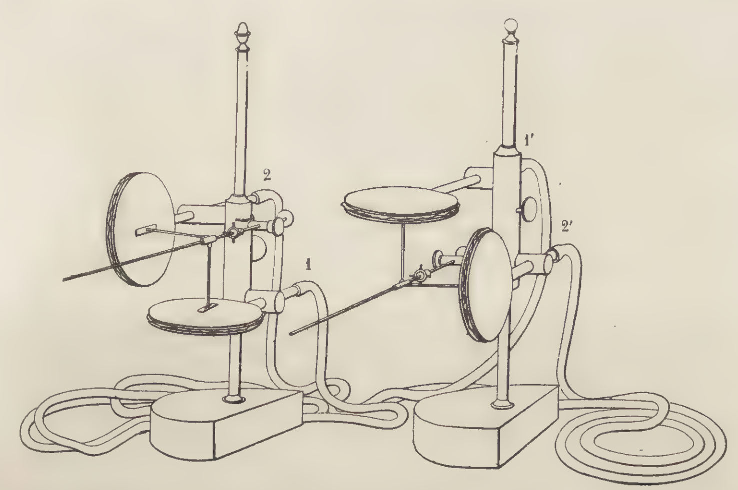


Fig. 51. — Tambours rectangulairement conjugués, au moyen desquels les mouvements imprimés à l'un des leviers sont répétés à distance par l'autre levier.

comme centre, des figures qui ne sont inscriptibles qu'à la surface d'une sphère creuse ayant pour rayon la longueur du levier. Une disposition spéciale[1], qui permet au levier de petits chan-

1. La solution la plus simple consiste à terminer le levier traceur par un ressort qui sert de pointe écrivante. La figure 52 représente, au bout du le-



Fig. 52. — Style à longueur variable.

vier, le ressort en question : il est large à sa base, afin de résister à toute tendance aux déviations latérales sous l'influence des frottements. Cette

gements de longueur, rend la trajectoire inscriptible sur une surface plane.

§ 74. **Trajectoire qu'un point de l'aile d'une Buse décrit autour de l'articulation de l'épaule.** — Pour adapter sur l'oiseau les deux tambours rectangulairement conjugués sur lesquels agit le levier explorateur, on a disposé ces pièces sur un léger bâti de bois qu'une sorte de corset fixait sur le dos de l'oiseau. Les deux tubes de caoutchouc servant à la transmission pendaient librement et accompagnaient l'oiseau dans son vol.

Une forte Buse adulte fut munie de cet appareil et, dans un vol d'une dizaine de mètres, donna la figure 53. La trajectoire de

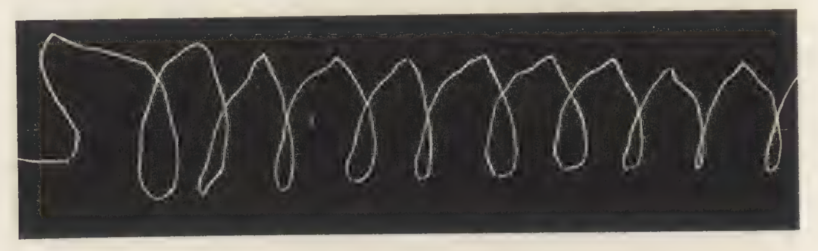


Fig. 53. — Tracé de la trajectoire de l'aile d'une Buse, recueilli sur une glace enfumée et animée d'une translation uniforme.

l'aile a été recueillie sur une plaque enfumée, animée d'un mouvement de translation uniforme, afin que les courbes successives ne se confondent pas entre elles.

base est implantée sur une pièce coudée faite d'aluminium creux et dont on comprend la fonction. Supposons que le levier s'élève et prenne la position indiquée par une ligne ponctuée, sa pointe écrivante, grâce à l'élasticité du ressort, garde son contact avec la glace qui reçoit le tracé.

1. Il était assez difficile de fixer à l'aile le levier du pantographe explorateur et de le rendre solidaire de tous les mouvements qu'elle exécute. C'est à l'aile bâtarde (§ 11) que j'ai fixé ce levier; mais comme ce point s'approche ou s'éloigne de l'épaule suivant que l'aile se plie ou s'étend, il a fallu laisser à ces mouvements la liberté de se produire. Pour cela, une pince de métal fixée à l'aile bâtarde portait un anneau dans lequel passait le levier explorateur. Enfin, comme ce levier, pour ne pas altérer la forme du mouvement, devait être parallèle au rayon du membre, j'ai dû recourir à un parallélogramme articulé dont on trouvera la description et la figure (*Machine animale*, p. 250).

Si l'on tient compte du déplacement de la glace qui recevait le tracé, on trouve qu'à chacun de ses battements, l'aile suivait une trajectoire à peu près elliptique. On a pu, du reste, s'en assurer en recueillant les tracés sur une glace immobile.

§ 75. **Inscriptions séparées des oscillations des ailes dans le sens vertical et dans le sens horizontal; reconstitution de la trajectoire au moyen des deux courbes ainsi obtenues.** — Sur des oiseaux de petite taille, il n'est guère possible d'établir

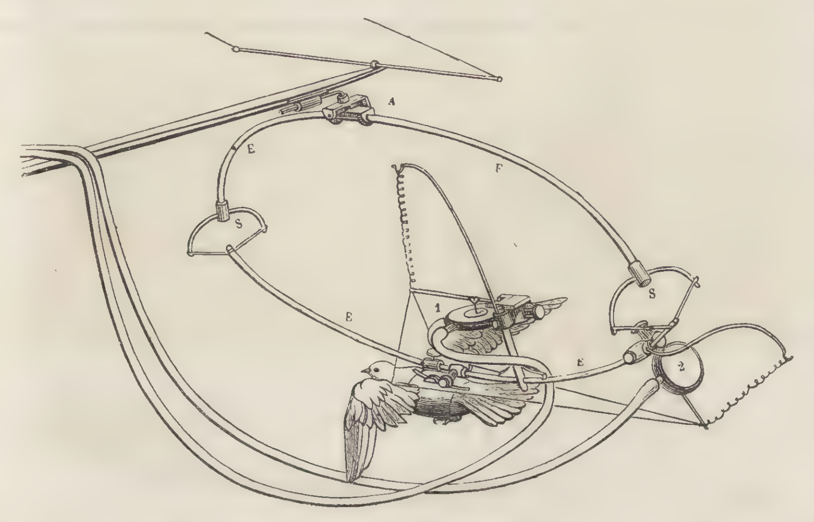


Fig. 54. — Pigeon attelé au manège et muni de tambours à transmission rectangulairement conjugués.

un appareil aussi volumieux que le pantographe dont il vient d'être question. Une autre disposition (fig. 54) m'a permis d'obtenir la trajectoire de l'aile en inscrivant simultanément, d'une part, ses mouvements verticaux avec un premier style, et d'autre part, avec un second style, les mouvements qu'elle exécute dans le sens antéro-postérieur. La combinaison de ces deux courbes recueillies séparément reconstitue la trajectoire de l'aile de l'oiseau.

Le point de l'aile que j'ai choisi dans cette expérience, pour en déterminer les mouvements, était l'extrémité de l'humérus qui avoisine l'articulation du coude. Deux fils, l'un vertical et

l'autre horizontal, sont attachés solidement à l'os qu'ils contournent, et se rendent chacun au levier d'un tambour explorateur. Les mouvements sont transmis, par des tubes à air, aux deux tambours enregistreurs dont les styles (fig. 55) tracent l'un audessus de l'autre.

Les tambours explorateurs doivent être solidement établis à une distance constante de l'oiseau ; ils doivent, en outre, accompagner celui-ci dans son vol.

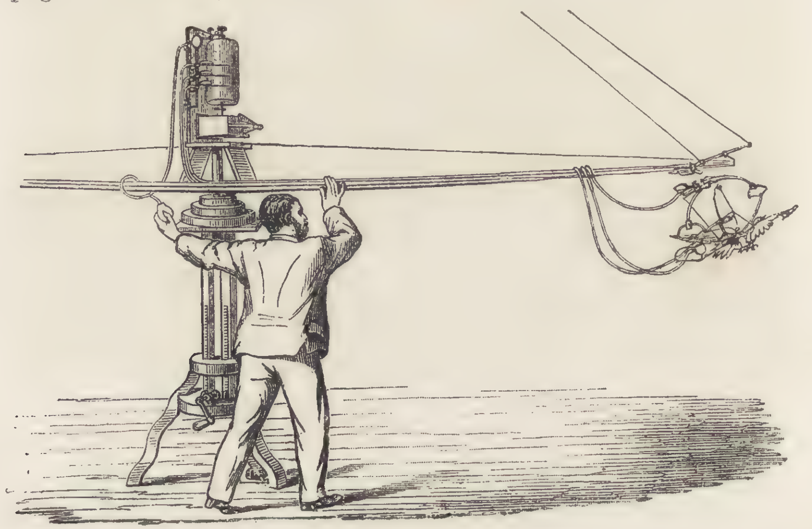


Fig. 55. — Disposition d'ensemble du manège.

Ici intervient le procédé, déjà mentionné, d'attelage de l'oiseau au bras d'un léger manège qu'il fera tourner en volant. Ce bras de manège porte une sorte d'ellipse de métal EEE (fig. 54), suspendue élastiquement. Un corset rigide, destiné à maintenir l'oiseau tout en laissant à ses ailes la liberté de leur mouvement, est fixé à l'arc inférieur de cette ellipse sur laquelle sont solidement établis les deux tambours.

Le tambour 1 reçoit les fils qui transmettent les mouvements des ailes dans le sens vertical; d'autres fils communiquent au tambour 2 les mouvements que l'humérus exécute dans le plan horizontal. Enfin des tubes à air, partant des deux tam-

bours explorateurs et suivant les bras du manège, envoient tous ces mouvements aux appareils inscripteurs. Ces derniers sont placés au centre du système (fig. 55) et tournent avec lui.

Quand l'oiseau ainsi attelé a pris son vol et entraîne le manège dans son mouvement tournant, l'opérateur, par la simple compression d'une poire en caoutchouc, amène les leviers traceurs en contact avec le cylindre ; alors les courbes s'inscrivent[1].

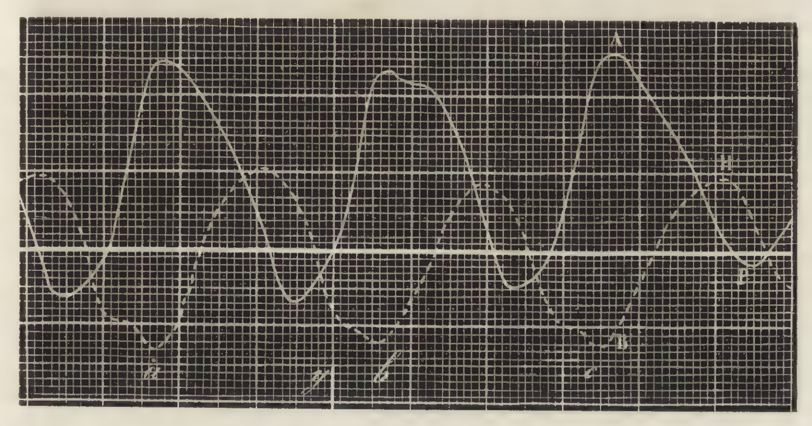


Fig. 56. — Courbes des mouvements de l'aile d'un Pigeon : AP, mouvements dans le sens antéro-postérieur ; HB, mouvements de haut en bas. Ces deux courbes ont été décalquées sur papier à divisions millimétriques et rapportées à un axe horizontal commun.

Ces courbes ont été reportées (fig. 56) sur un papier quadrillé, afin d'en faciliter l'étude.

On voit, au premier coup d'œil, que les mouvements de l'humérus sont beaucoup moins étendus dans le sens vertical que d'avant en arrière, ainsi qu'on pouvait déjà le présumer d'après la conformation de la tête humérale. Au point de vue de la durée, la phase d'arrière en avant et celle d'abaissement sont plus longues que leurs contraires.

Mais c'est en combinant les deux courbes qu'on obtient le renseignement le plus important, la trajectoire de l'extrémité cubitale de l'humérus, pendant un battement complet.

1. Pour le détail des appareils et des expériences, voir Marey, *Vol des insectes et des oiseaux*. Ann. des sciences naturelles, 1869, t. XII, et Bibliothèque des Hautes-Études, 1871.

La figure 57 montre cette trajectoire construite par points et rapportée à deux axes, l'un vertical, l'autre horizontal ; une

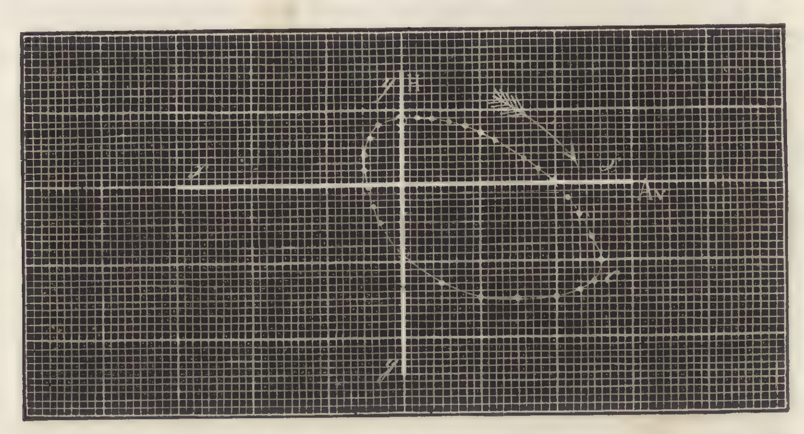


Fig. 57. — Trajectoire elliptique de la pointe de l'aile reconstruite d'après les courbes de la figure 56.

flèche indique la direction du mouvement de l'humérus suivant cette courbe[1].

1. Voici comment est construite, par points, la trajectoire de l'extrémité de l'humérus pendant la durée d'un battement d'ailes. Les courbes représentées (fig. 56) sont superposées de telle sorte que leurs lignes de zéro se confondent.

J'appelle *ligne de zéro*, dans la courbe des mouvements suivant la verticale, celle qui correspond aux instants où l'humérus est horizontalement dirigé. Dans la courbe des mouvements horizontaux, elle correspond au moment où l'aile est sensiblement perpendiculaire à l'axe du corps de l'oiseau. Dans ces deux courbes, les points qui se trouvent sur une même division millimétrique correspondent à un même instant, à cause de la parfaite superposition des pointes des deux leviers inscripteurs.

Pour construire, d'après les deux courbes des mouvements verticaux HB (ligne ponctuée) et des mouvements horizontaux AP (ligne pleine), la trajectoire qui en résulte, on trace deux droites perpendiculaires entre elles (fig. 57) ; ce sont les axes xx et yy auxquels se rapportera chacune des positions de l'aile à chacun des instants successifs de son mouvement.

On convient d'abord que tout ce qui est en haut de la ligne des zéros dans la courbe pleine AP, c'est-à-dire tout ce qui correspond à un mouvement dans le sens *antérieur*, devra se pointer à droite de la ligne yy. Inversement, ce qui est au-dessous des zéros dans la même courbe devra se

Ainsi, *l'humérus du Pigeon se porte en bas et en avant pendant le coup frappé sur l'air, puis remonte après s'être porté en arrière.*

Cette première notion vient compléter ce que l'observation avait déjà montré d'une manière partielle, à savoir que l'aile exécute deux sortes de mouvements, les uns dans le sens vertical, les autres dans le sens horizontal.

§ 76. La vitesse de l'humérus, à chaque instant de son parcours, se déduit de l'écartement que laissent entre eux deux points consécutifs de sa trajectoire.

La figure 57 montre donc que l'aile qui vient de terminer sa

pointer à gauche de l'axe des y. La position par rapport à cet axe sera comptée, parallèlement à lui, au moyen des divisions millimétriques.

D'autre part, les différentes mesures prises sur la courbe ponctuée HB exprimant les hauteurs de l'aile devront se pointer à la hauteur correspondante, comptée en dessus ou en dessous de l'axe des x, selon que ces points, dans les courbes des hauteurs, s'éloignent de la ligne des *zéros*, d'un certain nombre de millimètres, soit en haut, soit en bas.

Prenons pour point de départ, dans la construction de la trajectoire, le point c choisi (fig. 56) sur la courbe ponctuée, à l'instant où l'aile est arrivée à l'une de ses limites inférieures. Ce point, d'après la graduation millimétrique, montre que l'aile est abaissée de 13 divisions au-dessous de l'horizontalité. Suivons la verticale qui passe par le point c, jusqu'à sa rencontre avec la courbe du mouvement de sens antéro-postérieur (ligne pleine); l'intersection de cette verticale avec la courbe nous montre que l'aile, en ce moment, était portée de 26 divisions en avant.

Sur la courbe de la trajectoire, le premier point devra donc être marqué en un lieu c déterminé par l'intersection de la 13ᵉ division au-dessus de l'axe des x avec la 26ᵉ division à droite de l'axe des y (la droite, dans notre convention, correspondant à la direction en avant).

Pour déterminer un second point de la trajectoire, portons-nous, dans la lecture des tracés (fig. 56), d'une division millimétrique plus loin vers la droite : nous relèverons, comme tout à l'heure, l'intersection de la verticale de ce point avec les deux courbes, et nous aurons, dans la construction nouvelle, un second point déterminé.

La série des points successivement définis de cette manière forme la courbe fermée 57 qui traduit le parcours de l'aile ; la flèche indique la direction du mouvement.

En construisant ainsi la figure entière, on voit qu'après s'être portée en bas et en avant, cette courbe s'élève en revenant en arrière. Comme dans le vol de la Buse, c'est encore une sorte d'ellipse que décrit l'aile ; le grand axe de cette ellipse est incliné en bas et en avant.

phase descendante se porte en arrière avant de remonter, et que *ce mouvement rétrograde est l'acte le plus rapide du battement d'ailes*, car les points dont est formée la trajectoire sont plus espacés en cet endroit que partout ailleurs.

Cette rétrogradation de l'humérus tient probablement, en grande partie, à une flexion du coude qui précède la remontée de l'aile.

§ 77. *La forme de la trajectoire est sensiblement elliptique*, ainsi que d'Esterno et Straus-Durckheim l'avaient supposé § 21 ; mais l'inclinaison du grand axe de cette ellipse n'est point en bas et en arrière comme le croyait d'Esterno ; elle se dirige au contraire en bas et en avant; enfin, elle s'approche beaucoup plus de l'horizontalité que ne le pensait Straus-Durckheim.

La trajectoire qui vient d'être représentée se rapporte non pas à un point de l'espace, mais à un point du corps de l'oiseau, au centre de mouvement de la tête humérale[1].

1. Dans l'expérience faite sur la Buse, c'est l'aile bâtarde dont on a déterminé la trajectoire ; sur le Pigeon, c'est l'extrémité inférieure de l'humérus. Abstraction faite des différences que présente le type du vol chez des oiseaux d'espèces différentes, le fait, pour les deux trajectoires, d'avoir été prises sur deux parties différentes de l'aile doit leur donner des formes dissemblables. Dans la flexion de l'aile, en effet, le coude se porte en arrière, tandis que le carpe et l'aile bâtarde se portent en avant. On voit par là que la connaissance des mouvements *d'un point* du squelette ne renseigne que bien imparfaitement sur les mouvements de l'aile, ce qui montre l'importance de recourir à des méthodes donnant une notion plus complète des mouvements de l'oiseau. Il sera question de ces méthodes au chapitre prochain.

La figure 61, obtenue sur une Buse, se rapproche davantage du cercle, mais c'est encore une sorte d'ellipse dont le grand axe, dirigé aussi en bas et en avant, est toutefois très voisin de l'horizontalité.

CHAPITRE VIII

INSCRIPTION DES EFFETS MÉCANIQUES DU COUP D'AILE

Torsion de l'aile sous l'influence de la résistance de l'air. — Inscription de cette torsion dans ses rapports avec les différentes phases d'un battement d'aile. — Figure représentant l'inclinaison de l'aile aux divers points de sa trajectoire. — Des réactions verticales que le coup d'aile imprime au corps de l'oiseau; caractères de ces réactions dans les différentes espèces. — Rapport des oscillations verticales avec les phases du battement de l'aile. — Variations de la vitesse de l'oiseau aux différentes phases du battement des ailes. — Résumé des applications de la méthode graphique à l'analyse des phénomènes du vol.

§ 78. Torsion de l'aile sous l'influence de la résistance de l'air. — Quand l'aile qui descend rencontre la résistance de l'air, cette résistance a pour effet de changer la courbure des rémiges et de tordre la surface de l'aile. Prechtl a montré l'utilité de cette élasticité des rémiges qui emmagasinent, à la façon d'un ressort, une partie du travail moteur dépensé dans le coup d'aile, et restituent ensuite ce travail en reprenant leur forme première [1].

Si les mouvements que l'aile décrit dans l'air, à chacun de ses battements, étaient parfaitement connus, il serait peut-être possible de prévoir à quel moment se produisent les changements de courbure des rémiges, les torsions et les détorsions de l'aile, mais, dans l'état encore imparfait de nos connaissances, il vaut mieux déterminer expérimentalement les différentes flexions de l'aile par l'effet de la résistance de l'air.

1. C'est toujours par l'action de tissus élastiques que l'organisme utilise les forces motrices, essentiellement intermittentes, qui sont engendrées dans le tissu musculaire. On trouve dans la circulation du sang d'intéressantes applications de ce principe.

D'autre part, l'effet des coups d'aile étant de soutenir l'oiseau et de le transporter dans l'air, il y a lieu de rechercher si l'oiseau va droit à son but comme une flèche, ou si, comme tous les genres de locomotion animale, le vol s'accompagne de certaines saccades qui consistent en changements périodiques de niveau et de vitesse de l'animal, changements rythmés avec l'action intermittente de ses muscles.

L'observation donne à cet égard quelques renseignements. Les battements des ailes impriment au corps des réactions verticales parfois très visibles, tandis que, dans le vol plané, l'oiseau paraît glisser sur l'air, sans présenter la moindre saccade.

Les oscillations verticales se voient très bien sur les Mouettes et les Goélands qui suivent les navires. Pendant de longues heures, on les voit sautiller à chaque battement d'ailes, et l'on peut apprécier l'étendue de ces oscillations, en prenant pour point de repère certains agrès du navire, le bord d'une vergue par exemple.

S'il y a des saccades dans le sens horizontal, elles doivent consister en variations périodiques de la vitesse de translation. Je crois avoir également observé des mouvements de ce genre sur les oiseaux de mer, mais ils sont beaucoup moins faciles à saisir que les changements de hauteur.

Ces diverses saccades, si elles sont fort prononcées, constituent, en réalité, des imperfections dans le vol : elles entraînent en effet une dépense de travail moteur entièrement inutile, puisqu'elle s'applique à imprimer à la masse de l'oiseau des accélérations de signes contraires[1].

C'est encore à la méthode graphique de déterminer si ces mouvements existent au même degré chez les différentes espèces et à quels instants du battement de l'aile ils se produisent.

Pour résoudre ces nouvelles questions, il faudra introduire quelques modifications dans les appareils que le lecteur connaît déjà.

1. Ce vol saccadé m'a paru ne se produire d'une manière bien nette que si l'oiseau s'astreint à ralentir son vol, pour le régler sur la vitesse du navire.

§ 79. **Inscription de la torsion de l'aile dans ses rapports avec les différentes phases d'un battement.** — Il a fallu faire subir certaines modifications à l'appareil pantographique pour qu'il pût fournir, en même temps que la trajectoire de l'aile, l'indication des changements d'inclinaison qu'elle présente aux différentes phases du battement[1].

L'appareil fut placé sur le dos d'une Buse vigoureuse et fami-

1. Pour faire comprendre la transmission et l'inscription des changements du plan de l'aile, considérons d'abord un appareil schématique (fig. 58) dont les organes sont réduits à une extrême simplicité.

La tige *tt* correspond au levier du pantographe explorateur placé sur le dos de la Buse. Cette tige peut exécuter autour d'un mouvement de Cardan *c* tous les mouvements possibles, sauf celui de torsion sur son axe. Si donc

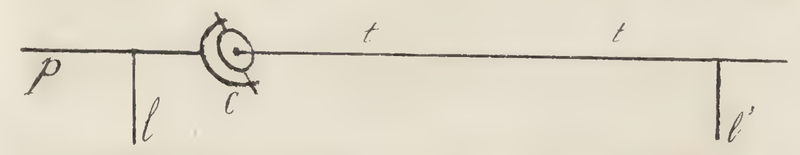


Fig. 58. — Représentation schématique du levier pantographique transmettant les changements de position de l'aile et les changements d'inclinaison de sa surface.

nous implantons sur la tige *tt'* une autre tige *l'* qui lui soit perpendiculaire et si nous cherchons au moyen de mouvements de torsion à dévier cette tige *l'* du plan où elle est située, le joint de Cardan résistera à cet effort.

Mais si, en arrière du joint de Cardan, la tige *p*, qui prolonge *tt*, peut pivoter sur son axe, les mouvements de torsion de *tt* se reproduiront en *p;* et si une tige *l*, parallèle à *l'*, est implantée sur *p*, les changements de plan imprimés à *l'* se répéteront fidèlement en *l*.

Imaginons enfin que les mouvements de *l* se transmettent à un style inscripteur par les moyens déjà connus, on aura ainsi la courbe des changements de plan de l'aile. Or, dans cette courbe, si les ordonnées positives expriment une rotation dans un sens à partir d'une situation définie du plan de l'aile, les ordonnées négatives exprimeront une rotation en sens contraire.

On comprendra, sans difficulté, la fonction des différentes pièces représentées fig. 59, avec la forme qu'on a dû leur donner dans la construction réelle.

tt est le levier du pantographe, A un arc métallique sur lequel passe un fil *v*, qui transmet à un tambour explorateur les mouvements de l'aile suivant la verticale. *h* est un autre fil qui transmet les mouvements de sens horizontal. C représente le joint de Cardan, et derrière celui-ci l'axe *tt* prolongé porte une poulie qui, suivant le sens de la torsion de l'axe, tourne à droite ou à gauche. Ce mouvement de rotation, suivant le sens où il s'opère,

liarisée depuis longtemps avec les expériences de ce genre. Du premier coup, j'obtins le tracé complet représenté par la figure 60.

Dans cette figure, la ligne pleine A P exprime les mouvements de l'aile dans le sens antéro-postérieur ; la ligne HB, formée de traits, traduit les mouvements de haut en bas, enfin la ligne S.

tire dans deux directions opposées le fil *rr*, qui actionne un troisième tambour transmettant les mouvements de rotation de la tige.

Reste à expliquer le rôle de la pièce terminale à 3 branches *bbb* qui s'adapte au levier pantographique.

Cette pièce est formée de languettes articulées autour d'un centre commun, à la façon des lames d'un éventail; on l'applique sur la face supérieure de l'aile, et l'on coud chacune des lames avec les tuyaux des rémiges auxquelles elles s'appliquent solidement. Le plan de ce petit éventail éprouvera donc tous les changements d'inclinaison que présentera la surface de

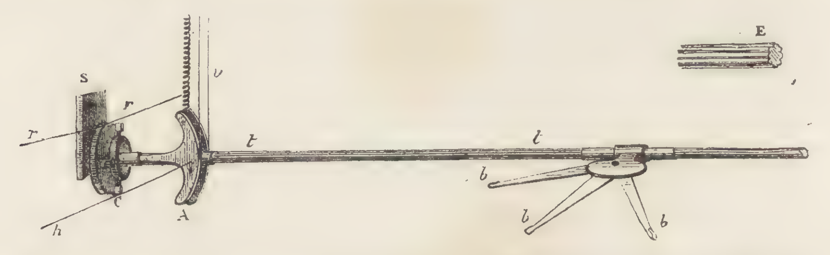


Fig. 59. — Disposition réelle du levier pantographique explorateur des mouvements de l'aile et de ses changements de plan.

l'aile sur laquelle il est fixé. A son autre extrémité, le petit éventail est soudé à un tube dans lequel s'introduit la tige *tt* qui y glisse librement, de telle sorte que, pendant les ploiements et déploiements de l'aile, l'éventail qui accompagne la main de l'oiseau se meut le long de la tige *tt*, en s'éloignant ou s'approchant de l'articulation de l'épaule.

Mais si ces glissements du tube sur la tige sont nécessaires, il est d'autre part indispensable que la tige ne puisse pas tourner dans ce tube, sans quoi les changements de plan imprimés à l'éventail ne se transmettraient pas, par la tige, à la poulie située derrière le joint de Cardan. Pour obtenir cet effet, j'ai donné à la tige *tt* une forme cannelée, et au trou du tube de l'éventail une forme étoilée, de telle sorte que chacune des cannelures de la tige glisse dans une des branches de l'étoile. Cette disposition, qui permet librement les glissements du tube sur la tige, rend au contraire la rotation de ce tube impossible sans que la tige tourne elle-même et transmette les changements d'inclinaison de l'aile qui lui ont imprimé sa torsion.

ponctuée, correspond aux torsions de l'aile dans les deux sens opposés.

Le sens de rotation de l'aile est ainsi exprimé dans la courbe S :

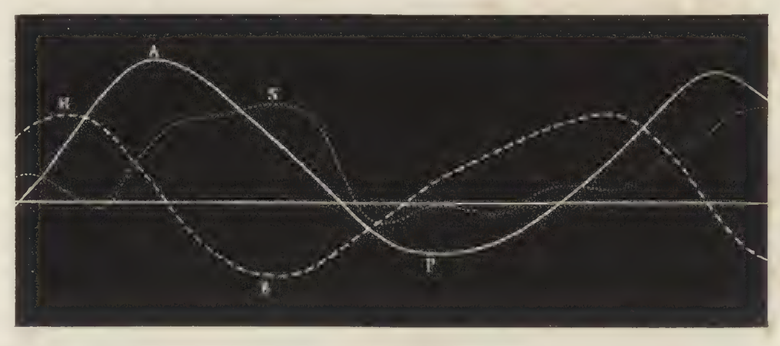


Fig. 60. — Trois courbes recueillies simultanément sur une Buse et correspondant, l'une HB aux mouvements d'élévation et d'abaissement de l'aile, l'autre AP à ses mouvements d'avant en arrière, la troisième S à sa torsion suivant son axe.

quand le bord postérieur de l'aile se soulève, la courbe s'élève ; quand ce bord s'abaisse, la courbe descend. Le zéro de la courbe S doit correspondre au moment où l'aile est horizontale.

§ 80. **Figure représentant l'inclinaison de l'aile aux divers points de sa trajectoire.** — J'ai construit, par les procédés géométriques indiqués au § 75, la trajectoire de l'aile de la Buse ; puis, en déterminant les différentes inclinaisons de l'aile qui correspondent aux différentes ordonnées positives ou négatives de la courbe S, j'ai tracé sur la trajectoire ces inclinaisons dans les positions que leur assignaient les relations de synchronisme existant entre les trois courbes.

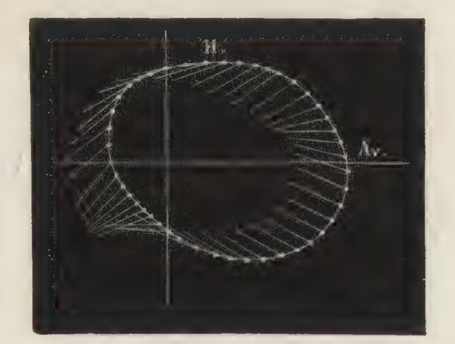


Fig. 61. — Trajectoire elliptique et changements de plan de l'aile d'une Buse.

On remarquera qu'à la fin de l'abaissement le plan de l'aile

change brusquement de direction et présente en avant la face qu'il tournait tout à l'heure en arrière. Il semble qu'on assiste à la détente élastique des rémiges qui avaient été bandées comme des ressorts par la résistance de l'air, pendant le coup d'abaissement[1].

L'expérience justifie donc la supposition des anatomistes qui, en constatant l'élasticité des rémiges, leur attribuaient le rôle de ressorts emmagasinant et restituant tour à tour une partie de l'effort des muscles.

J'ai montré ailleurs que si des muscles agissent d'une manière intermittente pour vaincre les résistances qui s'accroissent plus qu'en raison de la simple vitesse, il y a avantage à prolonger l'action de la force par l'élasticité d'un ressort[2]. Or, c'est précisément le cas des muscles de l'aile de l'oiseau : la résistance qu'ils rencontrent dans l'air et celle que leur présente l'inertie de la masse de l'oiseau, croissent toutes deux comme le carré de la vitesse. Tout ce qui prolonge la durée de l'effort des muscles de l'aile produira donc une économie de travail.

L'inscription mécanique des changements d'inclinaison de l'aile et de sa trajectoire a pour défaut principal d'exiger des expériences très laborieuses et la construction d'appareils très délicats[3] ; mais les résultats qu'elle a donnés sont d'autant plus

1. Certaines considérations et les résultats d'expériences ultérieures me portent à croire que l'orientation de cette figure est défectueuse et que le grand axe de l'ellipse devrait être relevé en avant par un mouvement tournant, de 35 degrés environ, imprimé à la figure.

Une autre remarque à faire au sujet de la figure 61, c'est que l'abaissement de l'aile y serait plus bref que la remontée. Ce fait, contraire à ce qui se passe d'ordinaire, est probablement dû à cette orientation défectueuse.

2. Marey, *La circulation du sang*, p. 163. Paris, G. Masson, 1881.

3. On a fait à l'inscription mécanique des mouvements de l'aile cette objection spécieuse, que l'oiseau attelé au manège et relié aux appareils explorateurs n'avait pas la liberté complète de ses mouvements, de sorte que les courbes inscrites ne seraient pas celles des mouvements du vol, mais exprimeraient des battements d'ailes incohérents.

Les personnes, aujourd'hui assez rares, qui ont été témoins de mes expériences n'ont pas admis ces objections, car elles ont vu avec quelle vivacité un Pigeon attelé entraînait le manège ; les actes qu'il exécutait ne différaient

précieux qu'ils confirment et complètent à certains égards ceux que j'ai obtenus par d'autres méthodes plus faciles, basées sur l'emploi de la photographie instantanée.

§ 81. **Des réactions verticales que le coup d'aile imprime au corps de l'oiseau.** — Jusqu'ici, nous n'avons considéré que des mouvements relatifs, comme ceux de l'aile par rapport à son point d'attache.

Dans les appareils employés pour inscrire ces mouvements, les tambours explorateurs étaient dans une position fixe par rapport au corps de l'oiseau. Il s'agit maintenant d'inscrire des mouvements absolus dont l'étendue doit être mesurée dans l'espace. Pour obtenir ce résultat, la disposition des appareils explorateurs doit être entièrement modifiée.

La méthode que j'ai employée est basée sur les effets de l'*inertie* d'une masse, c'est-à-dire sur la résistance que cette masse oppose aux forces qui tendent à lui imprimer une accélération.

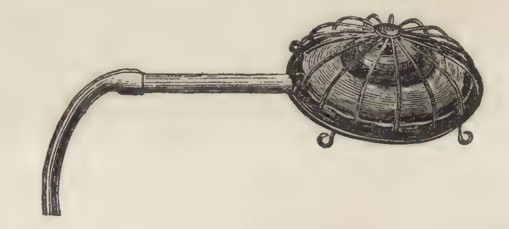


Fig. 62. — Appareil explorateur des réactions verticales de l'oiseau.

Sur la membrane d'une capsule à air semblable à celle d'un tambour à levier on place (fig. 62) une petite masse de plomb. Si l'on imprime à la capsule de rapides mouvements vibratoires dans le sens vertical, la masse de plomb, qui est sollicitée à exécuter ces mouvements par l'intermédiaire de la membrane élastique du tambour, résistera par son inertie aux accéléra-

certainement pas du vol normal, autant du moins que l'observation permettait d'en juger. D'ailleurs, dans certains genres d'expériences, l'oiseau emportait avec lui les appareils explorateurs et volait sur un parcours de 15 mètres, à peu près avec autant d'aisance que lorsqu'il était libre.

tions imprimées à la capsule; ce sera au contraire la capsule qui se déplacera par rapport à la masse. Il en résulte des compressions et des raréfactions de l'air, changements de pression qui se transmettront, par le tube de communication, à un tambour inscripteur[1].

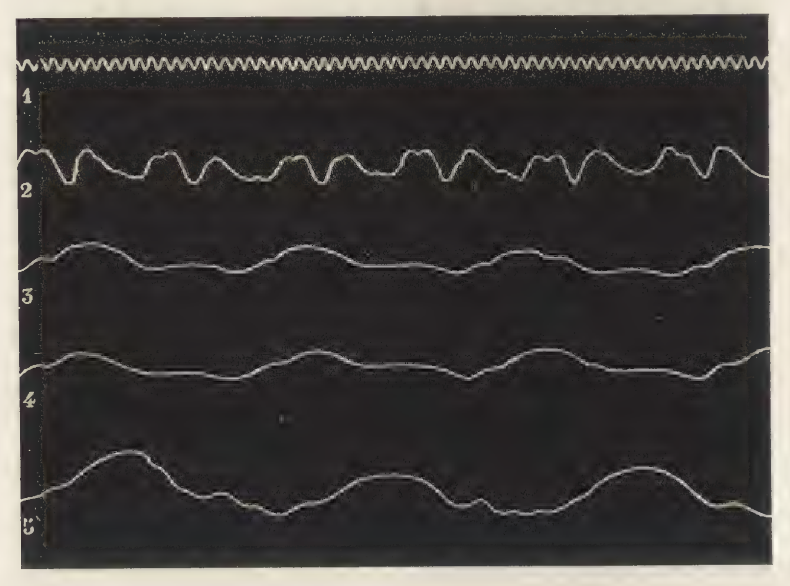


Fig. 63. — Courbes des oscillations verticales de différents oiseaux pendant le vol. — Ligne 1, vibrations d'un diapason de 100, VD; 2, oscillations verticales du Canard; 3, du Buzard; 4, de la Chouette effraie; 5, de la Buse.

On applique sur le dos d'un oiseau la capsule munie d'une masse (fig. 62), et reliée par un tube d'une longueur suffisante à un tambour inscripteur; on fait voler l'oiseau et l'on obtient une courbe dont les élévations et les abaissements correspondent, en forme et en direction, aux accélérations verticales du vol[2].

1. Pour avoir le plus de fidélité possible dans l'inscription de ces mouvements, il faut que les variations de la force élastique de la membrane soient très faibles par rapport à la masse sur laquelle elles agissent. Du reste, des expériences de contrôle doivent toujours être faites pour déterminer le degré de précision avec lequel se transmet et s'inscrit le mouvement qu'on étudie. (*Mém. sur le vol des insectes et des oiseaux*, loc. cit., p. 245.)

2. Dans les expériences faites sur l'oiseau, il faut se mettre à l'abri d'une

§ 82. **Caractères des réactions verticales dans les différentes espèces.** — Les tracés obtenus diffèrent suivant l'espèce sur laquelle on opère. Les figures 64 et 65 montrent plusieurs types ; le tracé d'un diapason de 100 vibrations doubles par seconde permettrait au besoin d'apprécier la durée de chaque oscillation et de ses phases[1].

§ 83. **Rapport des oscillations verticales avec les phases du battement de l'aile.** — Pour savoir à quel instant de la révolution de l'aile correspond chacune des inflexions de la courbe des oscillations verticales du corps, il faut inscrire simultanément l'action des muscles de l'aile et les mouvements du corps. La figure 64 montre un exemple de ce genre d'inscription obtenu sur un Canard. La figure 65 a été recueillie sur une Buse. On voit, sur ces figures, que deux oscillations verticales se produisent à chaque coup d'aile[2].

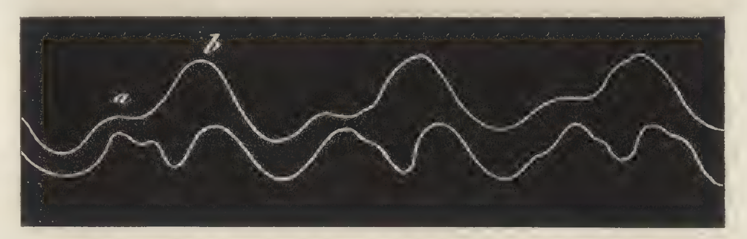


Fig. 64. — Tracés simultanés des contractions des muscles pectoraux du Canard (courbe supérieure) et des oscillations verticales de l'oiseau (courbe inférieure).

cause d'erreur spéciale : les plumes des ailes frôlent parfois la membrane du tambour et produisent dans le tracé des vibrations accidentelles. On y remédie en couvrant l'appareil d'un grillage qui protège la membrane et la masse qui la recouvre contre tout contact extérieur (fig. 62). Quatre crochets permettent de relier solidement la capsule au corset.

1. Quant à l'amplitude des oscillations, il est difficile de l'apprécier exactement, car la masse résiste aux mouvements qui lui sont communiqués par la membrane, non en raison de l'amplitude, ni même de la vitesse de ces mouvements, mais en raison de l'intensité de l'*accélération* qui lui est communiquée.

2. Des expériences antérieures ayant montré que, dans le vol du Canard, la courbe musculaire *a* correspond à l'élévation de l'aile, et la courbe *b* à l'abaissement. On voit, d'après la superposition des deux courbes, qu'une

Pour expliquer ces deux sortes d'inflexion de la courbe qui prouvent que l'oiseau s'élève quand il frappe l'air et qu'il s'élève également quand son aile remonte, j'ai proposé la théorie suivante :

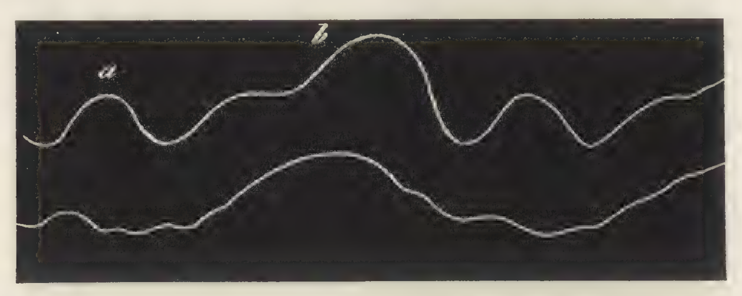


Fig. 65. — Tracés simultanés des contractions des muscles pectoraux de la Buse et des oscillations verticales de l'oiseau.

L'ascension de l'oiseau qui abaisse son aile et prend un point d'appui sur l'air s'explique d'elle-même : elle ressemble de tous points à celle qui se produit chez les animaux terrestres, chaque fois qu'un de leurs membres prend son appui sur le sol ; mais l'ascension de remontée m'a paru devoir s'expliquer tout autrement. L'oiseau qui a fini d'abaisser ses ailes présente obliquement le plan de ses rémiges contre le *vent de sa vitesse*, § 19. S'il est animé d'une translation rapide, il se comportera, pendant cette phase du battement de son aile, comme un cerf-volant, et montera sur l'air par un mécanisme analogue à celui qui a été décrit § 4 à propos de la *ressource*.

Si cette théorie est vraie, il s'ensuit nécessairement que les oscillations ascendantes ne doivent se produire que si l'oiseau est déjà animé d'une certaine vitesse de translation ; elles manqueront au contraire pendant les premiers instants du vol. Cette prévision est entièrement vérifiée par l'expérience.

oscillation verticale accompagne la remontée de l'aile et qu'une autre oscillation de même sens correspond à l'abaissement. Pour la Buse, deux oscillations s'observent aussi à chaque battement de l'aile ; mais celle qui correspond à l'élévation *a* est beaucoup plus faible que celle qui se produit pendant l'abaissement *b*.

Une autre conséquence de la théorie que je propose, c'est que le soulèvement de l'oiseau qui coïncide avec la remontée de l'aile, s'effectuant aux dépens de la force vive dont il est animé, devra s'accompagner d'une diminution de la vitesse du vol. Ce fait est confirmé par les expériences qui vont être décrites.

§ 84. **Variations de la vitesse de l'oiseau aux différentes phases du battement de ses ailes.** — Au lieu de placer la capsule horizontalement sur le dos de l'oiseau, avec la masse tournée vers le haut, si nous orientons la membrane dans le plan vertical, avec la masse tournée en avant, l'appareil, au lieu d'obéir aux oscillations verticales de l'oiseau, traduira ses variations de vitesse horizontale. Avec la disposition qui vient d'être décrite, les accélérations positives se traduiront par une élévation, les ralentissements par une descente de la courbe.

L'expérience a montré que le vol des oiseaux n'est point uniforme ; il est au contraire saccadé, avec des accroissements de vitesse à chaque abaissement des ailes et des ralentissements à chaque remontée [1].

§ 85. **Résumé des applications de la méthode graphique à**

1. J'ai réussi à inscrire dans une même courbe les deux ordres d'oscillations que le corps de l'oiseau exécute à chaque coup d'aile : c'est-à-dire, d'une part les oscillations verticales dont on vient de voir les tracés, et d'autre part des oscillations horizontales, c'est-à-dire des accélérations et des ralentissements de la vitesse du vol. La méthode employée est la suivante :

Qu'on se reporte à la figure 49 et qu'on imagine une petite balle de plomb adaptée sur le levier explorateur très raccourci. L'inertie de cette masse fait que si l'on agite l'appareil tout entier dans un plan perpendiculaire à celui des deux tambours, le levier alourdi n'obéira pas librement à ce mouvement et, suivant les accélérations qui lui seront communiquées dans les deux sens, comprimera tour à tour les deux membranes auxquelles il est relié, de sorte que le levier terminal inscripteur répétera les variations de la vitesse imprimée aux tambours.

Après avoir constaté, par une expérience d'essai, que la transmission se fait d'une manière exacte, on applique sur le dos d'une forte Buse le pantographe à transmission muni d'une balle de plomb ; le tracé recueilli pendant le vol est représenté fig. 66. On y voit que l'oiseau oscille deux fois dans le sens vertical pendant un battement des ailes, ce que nous savions déjà. Mais on voit aussi que, pendant ce coup d'aile, il accélère sa transla-

l'analyse des phénomènes du vol. — Ces expériences, dont je n'ai donné ici qu'une idée très sommaire, ont été extrêmement laborieuses, mais les résultats qu'elles ont donnés sont importants; ils ont été plus tard entièrement confirmés par des méthodes différentes.

De ces applications de la méthode graphique à l'étude du vol on peut tirer comme conclusions les propositions suivantes :

1° Les oscillations verticales de l'aile varient dans chaque espèce d'oiseau ; l'abaissement dure plus longtemps que la descente, surtout chez les grandes espèces.

2° Les mouvements de l'aile d'avant en arrière sont en général plus étendus que les mouvements verticaux, principalement à la région du coude.

3° La trajectoire qui résulte de la composition des deux mouvements précités varie aux différents points de l'aile, à cause des flexions et extensions du coude et du carpe. Cette trajectoire est, pour l'humérus, voisine d'une ellipse dont le grand axe,

tion au moment où les ailes s'abaissent, qu'il la ralentit au contraire pendant que les ailes remontent.

On voit aussi que le ralentissement qui accompagne la relevée de l'aile ne prend d'importance qu'au moment où l'oiseau a acquis une certaine vitesse

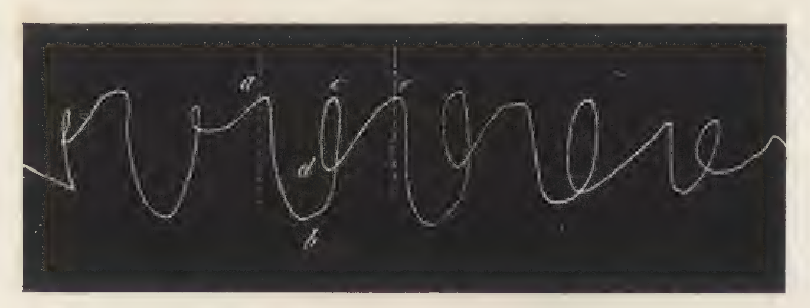


Fig. 66. — Combinaison des réactions verticales et des variations de vitesses d'une Buse au moment de l'essor.

et qu'à ce moment aussi, l'oscillation verticale qui accompagne la remontée des ailes devient plus forte. Ces faits, qui ont été analysés ailleurs (*La machine animale*, p. 280) avec plus de détails, montrent bien que *le soulèvement du corps qui accompagne la remontée de l'aile se fait aux dépens de la vitesse de l'oiseau.*

légèrement incliné en bas et en avant, s'approche de l'horizontalité. Pour la région du carpe, cette courbe est presque circulaire dans le plein vol. Elle est d'une forme très compliquée à l'extrémité de l'aile, surtout au moment de l'essor.

4° La surface des rémiges s'incline sur la résistance de l'air pendant l'abaissement de l'aile. Cette inclinaison s'accompagne de la déformation des rémiges, dont la tige se redresse plus ou moins. A la fin de l'abaissement, les rémiges reprennent soudainement leur courbure à la façon d'un ressort qui reviendrait à sa forme. Cette action, qui rend à l'aile sa courbure normale, prolonge l'abaissement du bord postérieur de l'aile après que les muscles abaisseurs ont terminé leur action.

5° Les mouvements de l'aile s'accompagnent de réactions sur le corps de l'oiseau. Des réactions verticales de très faible amplitude s'observent dans certaines espèces (Canard) au moment de l'abaissement de l'aile et au moment de sa remontée. Chez les oiseaux à grandes ailes et à battements lents, les réactions sont fortes pendant l'abaissement des ailes, presque nulles pendant leur remontée.

6° Des réactions analogues s'observent dans le sens horizontal : elles consistent en accélérations et ralentissements de la progression de l'oiseau. Ces réactions se combinent entre elles de la manière suivante :

L'abaissement de l'aile soulève et en même temps propulse le corps de l'oiseau.

L'élévation de l'aile, lorsqu'elle produit le soulèvement ou seulement la suspension de l'oiseau, s'accompagne d'une perte correspondante de vitesse. Dès lors, on est en droit d'admettre que cette élévation se fait aux dépens de la vitesse de l'oiseau, qui se soutient en présentant ses ailes contre l'air, à la manière d'un cerf-volant, et par un mécanisme analogue à celui qui produit la *ressource* des oiseaux de proie.

CHAPITRE IX

ANALYSE DES MOUVEMENTS DU VOL PAR LA PHOTOGRAPHIE

Analyse du mouvement par la photographie instantanée. Méthode de Muybridge. — Fusil photographique. — Série d'attitudes successives de l'oiseau. — Des photographies sur champ obscur. — Photographie des trajectoires. — De la photochronographie. — De la vitesse de l'oiseau étudiée par la photochronographie.

L'inscription mécanique des mouvements de l'aile, de ses changements de plan, des réactions qu'elle imprime au corps de l'oiseau, m'avait rendu l'observation du vol plus facile et m'avait appris à voir, sur certaines espèces, la plupart des phénomènes que révèlent les tracés[1].

Mais, outre que les dispositions fort compliquées auxquelles il avait fallu recourir n'inspiraient pas à tout le monde autant de confiance qu'à moi-même, il était important d'employer quelque moyen nouveau pour contrôler la réalité des phénomènes que la méthode graphique venait de faire découvrir[2]. La

1. L'emploi des appareils inscripteurs conduit assez vite à une éducation des sens qui les rend plus subtils. Ainsi, l'habitude de recueillir les tracés du pouls avec le sphygmographe permet bientôt d'apprécier avec le doigt des nuances délicates des battements artériels qu'on ne saisissait pas auparavant. L'analyse chronographique des allures du Cheval conduit bien vite à distinguer à simple vue l'ordre de succession des battues des quatre pieds.

2. Les objections faites aux résultats donnés par l'inscription graphique du vol sont de différentes natures. Hureau de Villeneuve (*L'Aéronaute*, 1873, p. 37) croit pouvoir déduire de la figure 61 que l'oiseau frappe l'air par la face supérieure de son aile pendant la remontée, acte incompatible avec

photographie instantanée me parut propre à contrôler les résultats déjà obtenus et à donner des connaissances nouvelles sur le mécanisme du vol.

§ 86. **Analyse du mouvement par la photographie instantanée.** — Dans ses mémorables expériences sur le passage de Vénus devant le soleil, Janssen avait montré que des photographies successives, prises à des intervalles de temps connus, permettaient de suivre les phases du mouvement de la planète. Mon savant confrère n'hésitait pas à considérer l'emploi de la photographie comme capable de résoudre les questions de mécanique physiologique relatives aux différentes formes de la locomotion des animaux[1]. Mais, à cette époque, le disque du soleil pouvait seul fournir assez de lumière pour impressionner instantanément les plaques photographiques dont on disposait.

Muybridge de San-Francisco réalisa les prévisions de Janssen. Par une méthode qui lui est propre, il obtint une série d'images photographiques représentant le cheval dans différentes attitudes et montrant les positions successives de chacun

le vol. On verra ce qu'on doit penser à cet égard, dans le chapitre XVII consacré au mécanisme de la remontée de l'aile. Pénaud (*ibid.*) croit à une erreur dans la même figure ; pour lui, le moment où les rémiges reviennent à leur forme normale par leur élasticité n'est pas correctement placé : en outre, dit-il, le plan de l'aile devrait être relevé au maximum pendant le milieu de la descente de l'aile, c'est-à-dire au moment de la vitesse maxima. Cette réflexion est parfaitement juste ; l'incorrection de la figure tient à ce que le grand axe de l'ellipse a été trop peu incliné sur l'horizon, par suite d'une appréciation inexacte de la ligne des *zéros* dans la courbe des changements de plan de l'aile. J'ai indiqué la correction à faire dans la note de la p. 120. Enfin Strasser (*Ueber die Flug des Vögel. Zeitchr., fur Naturwissenschaft. Jéna*, 1885, p. 62) trouve exagéré l'angle de 90° que formerait le plan des rémiges entre ses deux inclinaisons de sens contraire. Sur ce point encore, je pense qu'il ne faut pas attacher trop de valeur à l'amplitude de l'angle indiqué dans la figure et que les appareils ne pouvaient traduire fidèlement ; ils démontrent seulement l'existence de changements d'inclinaison de l'aile. Les méthodes dont il sera question aux chapitres prochains définiront beaucoup plus complètement les divers mouvements de l'aile.

1. *Bulletins de la Société française de photographie*, n° du 14 déc. 1876.



Fig. 67. — Photographies instantanées de Muybridge montrant en silhouettes les attitudes successives d'un cheval au galop. La première image est en haut et à gauche. Les divisions verticales tracées sur le fond blanc de l'écran sont écartées l'une de l'autre de $0^m,56$; ces repères servent à mesurer la vitesse de translation et l'étendue des mouvements des membres.

des membres de l'animal, avec les déplacements de son corps dans les diverses allures (fig. 67).

§ 87. **Méthode de Muybridge.** — La méthode de Muybridge consistait à braquer sur le cheval en mouvement autant d'appareils photographiques que l'on voulait obtenir d'images successives. L'animal lui-même rencontrait sur son chemin une série de fils électriques et les rompait successivement, ce qui provoquait les chutes également successives des obturateurs de tous les appareils photographiques[1].

Un écran blanc, fortement éclairé par le soleil, formait un fond lumineux sur lequel se détachait en silhouette l'animal en mouvement. Enfin des divisions métriques tracées sur l'écran permettaient d'apprécier l'étendue des déplacements que subissait chaque partie du corps entre deux images consécutives[2].

En présence des admirables résultats qu'il avait obtenus, je priai M. Muybridge de vouloir bien étudier les mouvements du vol; mais sa méthode ne se prêtait pas à recueillir des images successives de l'oiseau, car on ne pouvait contraindre celui-ci à voler dans une direction déterminée et à rompre en volant une série de fils, afin d'actionner successivement les divers appareils photographiques. Muybridge réussit toutefois à prendre des photographies instantanées représentant un groupe de Pigeons qui s'envolaient. Ces images, qu'il me fit voir lors de son passage à Paris en 1881, étaient fort intéressantes, car chaque oiseau s'y trouvait présenté dans une attitude particulière correspondant à un certain moment du battement de ses ailes. Le temps de pose était fort court (environ 1/500 de seconde d'après Muybridge); ainsi, malgré la rapidité des mouvements de l'aile,

1. J'ai donné la description des appareils de Muybridge d'une manière assez complète. *Méth. graphique*, 2e édition, supplément, p. 8.

2. Les expériences de Muybridge confirmèrent les résultats que m'avait donnés la chronographie au point de vue de la succession des battues des pieds aux différentes allures (voir *La machine animale*, 3e édition, appendice. Paris, 1883), elles y ajoutèrent la connaissance des mouvements qu'exécute chaque membre au levé.

on pouvait en saisir les différentes attitudes et même les changements de plan.

Je retrouvai, sur ces images, la représentation de certains mouvements que la méthode graphique avait indiqués. Ainsi le mouvement de l'aile en avant pendant la fin de sa descente (§ 75) se traduisait par une attitude singulière dans laquelle la tête de l'oiseau était beaucoup dépassée en avant par la pointe de l'aile. Le changement de plan des rémiges, relevées par la résistance de l'air, était aussi clairement indiqué dans ces images. Mais ce qui leur manquait c'était la disposition en série, qui rendait si intéressantes les photographies obtenues sur le cheval.

Il fallait donc modifier la méthode et construire un appareil simple, portatif, au moyen duquel on pût, sur un oiseau volant en liberté, prendre une série d'images photographiques instantanées, à des intervalles de temps assez courts pour que plusieurs images consécutives correspondissent aux phases successives d'un même battement de l'aile.

Je m'arrêtai à une disposition basée sur le principe du revolver astronomique de Janssen ; mais une grande difficulté se présentait : la rapide succession avec laquelle les images devaient se produire. Une glace sensible devait, 10 à 12 fois par seconde, exécuter un mouvement tournant, s'arrêter, recevoir l'image et se déplacer de nouveau pour s'arrêter encore, jusqu'à ce que les 12 images de l'oiseau fussent recueillies.

§ 88. **Fusil photographique.** — J'ai réussi à construire le *fusil photographique* représenté fig. 68, qui répondait aux conditions ci-dessus indiquées. Des glaces sensibles, au gélatinobromure d'argent, taillées en forme de disques ou d'octogones, se placent dans la culasse du fusil avec les précautions nécessaires pour que la lumière ne les impressionne pas. On vise l'oiseau comme le ferait un chasseur, puis, en pressant la détente, on provoque la rotation de la plaque sensible et les mouvements de l'obturateur[1].

1. Pour la description de ce mécanisme, voir *La Méthode graphique* 2e édition, Supplément.

§ 89. **Série d'attitudes successives de l'oiseau.** — La glace sensible, retirée à l'abri de la lumière et développée, donne des

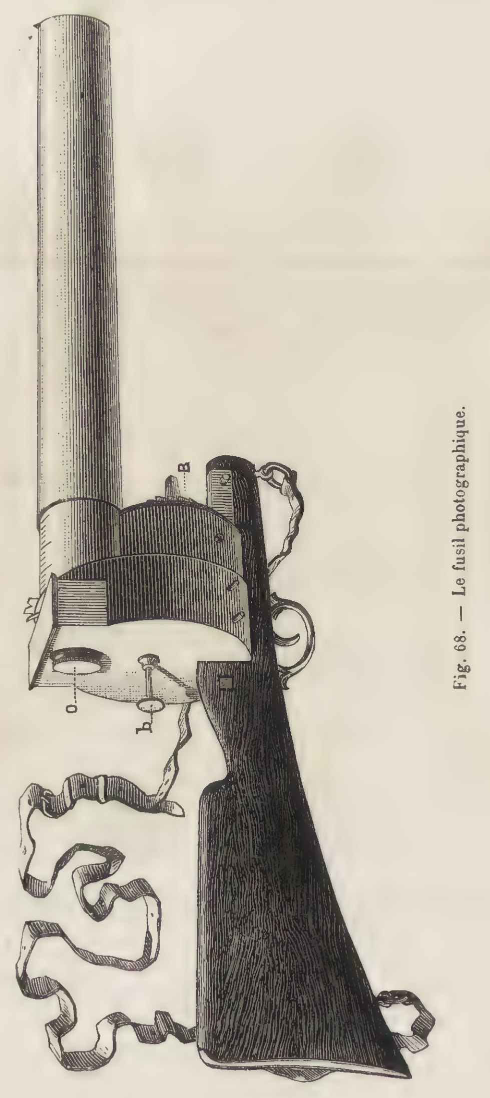


Fig. 68. — Le fusil photographique.

images disposées circulairement comme le montre la figure 69. Ces images sont fort petites ; mais, en les agrandissant, on obtient des silhouettes de l'oiseau montrant les attitudes successives du

vol. Parfois, dans de bonnes conditions d'éclairage, on a un certain modelé ; alors les images montrent nettement les détails du corps et des ailes avec les torsions de leur plan. Lorsque l'oiseau dont on prend les photographies se détache sur un fond

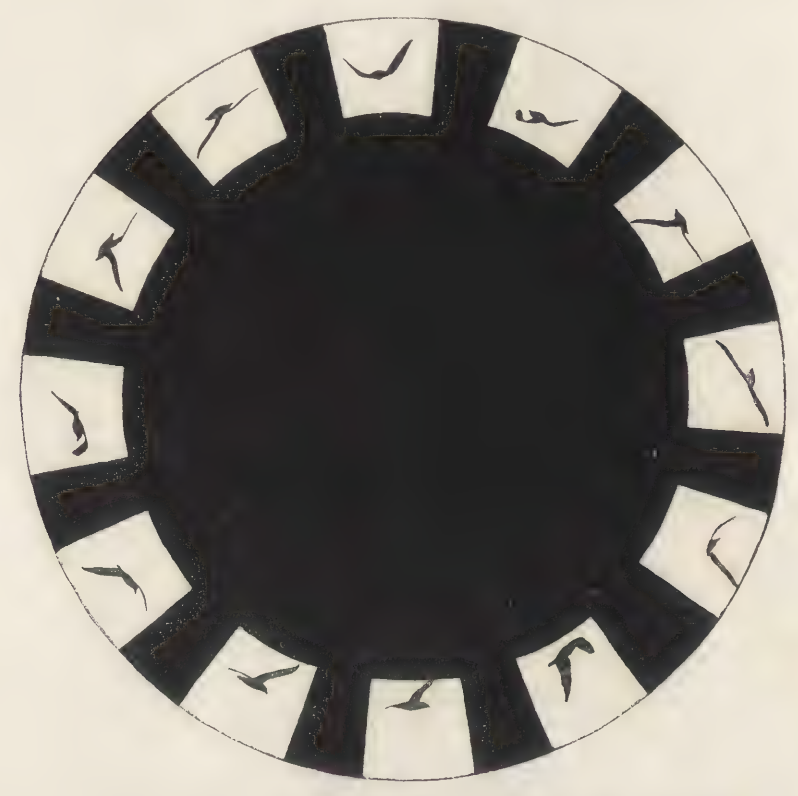


Fig. 69. — Épreuve positive du fusil photographique montrant douze images d'une Mouette qui vole. Ces douze images ont été photographiées en une seconde ; pour chacune d'elles le temps de pose a été $\frac{1}{720}$ de seconde. L'oiseau se détachait en silhouette sur le fond clair du ciel.

obscur, on obtient des images modelées qui donnent des renseignements intéressants sur les mouvements des ailes. La figure 70 montre les attitudes successives d'un Goéland qui volait au-devant d'un fond noir.

Dans les cas ordinaires, c'est sur le ciel lumineux que l'oiseau se détache ; les images ne sont alors que des silhouettes, mais,

avec un peu d'habitude, on arrive à y trouver les détails nécessaires pour comprendre les différentes attitudes de l'oiseau. La figure 71 montre combien de curieuses particularités on peut saisir au moyen du fusil photographique appliqué à l'analyse des mouvements du vol.

Fig. 70. — Épreuve positive du fusil photographique montrant une Mouette qui vole dans la direction de l'observateur. L'oiseau se détache sur un fond obscur, ce qui fait que ses images présentent un certain modelé au lieu d'une simple silhouette. Une imperfection dans la visée a fait que la douzième image ne s'est pas produite.

Avec cet instrument ou avec quelque autre analogue et facilement portatif, un voyageur pourra prendre des images de l'Aigle qui plane, de la Frégate, du Condor, du Pélican, des grands oiseaux voiliers qui se laissent porter par le vent sans donner un coup d'ailes.



Fig. 71. — Silhouettes diverses d'oiseaux et de chauve-souris, obtenues avec le fusil photographique.

Ceux qui s'intéressent à la physiologie de la locomotion aérienne ne connaissent guère ces beaux phénomènes que par les récits des voyageurs. Et il est probable que ceux qui ont pu les voir par eux-mêmes ont laissé échapper bien des détails importants que la photographie eût fixés pour toujours.

Le degré de sensibilité des plaques photographiques influe beaucoup sur la qualité des images. Des plaques très sensibles permettent de photographier l'oiseau sur un fond de couleur sombre; on a ainsi, au lieu de simples silhouettes, des images

EXPLICATION DES IMAGES CONTENUES DANS LA FIGURE 71.

Les silhouettes ont été groupées le plus souvent en séries représentant les attitudes des différentes espèces d'oiseau dans l'ordre de leur succession naturelle.

Hibou. — En bas de la page, H^1 représente un Hibou au moment où il commence à abaisser les ailes; H^2 et H^3 montrent des phases de plus en plus avancées de l'abaissement; H^4 les représente les ailes relevées. La forme sphérique de la tête de l'oiseau en rend la silhouette difficilement intelligible au premier abord; une autre cause d'obscurité est l'inclinaison oblique du corps de l'oiseau.

Faisan argenté F. — Il est représenté au moment de l'essor et au milieu de l'abaissement de ses ailes; l'oiseau est également orienté un peu obliquement.

Pigeon. — P^1 montre la fin de l'abaissement des ailes; P^2, le début de cet abaissement. L'animal représenté en P^3 est un Pigeon Montauban : cette espèce vole très mal; p^1, Pigeon paon vu obliquement au milieu de l'abaissement de ses ailes; p^2, le même à la fin de l'abaissement.

Mouette. — M représente une Mouette volant horizontalement à une faible hauteur. Les positions 1, 2, 3, 4, 5, correspondent à des degrés successifs de l'abaissement des ailes; M^6 est une Mouette planant et vue d'en haut; M^7, Mouette vue obliquement dans un temps du vol plané; M^8, Mouette au début de l'abaissement des ailes.

Bécassine. — B^1 et B^2, l'oiseau est vu presque de face; B^3, l'oiseau est vu de côté et par dessous à la fin de l'élévation des ailes; B^4, B^5, il se laisse glisser sur l'air avec les ailes demi-fléchies.

Grive. — G^1, l'oiseau vu de dessous au début de l'abaissement des ailes; G^2, il tient ses ailes serrées et se lance comme un projectile jusqu'à un nouveau coup d'ailes.

Émouchet. — Planant presque immobile, le bec tourné contre le vent, l'oiseau reste en place sans coups d'ailes. C'est ce qu'on nomme aussi *vol stationnaire.* Il semble que des courants d'air ascendants soient nécessaires pour ce genre de vol.

Canard. — C^1 C^2, divers degrés de l'élévation de l'aile; C^3, fin de l'abaissement.

Chauve-souris. — Ch^1, milieu de l'élévation de l'aile; l'animal est vu par dessous; Ch^2, fin de l'abaissement des ailes, vu d'arrière; Ch^3, début de l'élévation des ailes; l'animal représenté avait perdu une partie de sa membrane inter-digitale du côté gauche; l'avant-bras dénudé imprimait des mouvements étendus à la main encore pourvue de ses membranes.

très détaillées et très instructives. Les figures 69 et 70 sont obtenues au moyen des pellicules Balagny [1].

On peut reprocher avec raison aux images des fusils photographiques de ne donner que les attitudes de l'oiseau et leur succession, mais de ne pas exprimer les positions de l'oiseau dans l'espace, ni la vitesse de sa translation. En effet, par cela même qu'on suit l'oiseau dans son vol en le visant comme ferait un chasseur, chacune des images doit se trouver au centre du petit compartiment qui lui est réservé sur la plaque sensible, et d'autant plus exactement dans ce centre que la visée a été plus juste [2].

En outre, les images données par le fusil ne dépassant pas le nombre de 11 à 12 par seconde, sont insuffisantes pour exprimer les phases successives d'une révolution de l'aile. Sur le Goéland qui ne donne que 3 1/2 battements d'ailes par seconde en plein vol, on obtient, il est vrai, quatre attitudes différentes dans une révolution de l'aile; mais sur les oiseaux dont les battements d ailes sont plus rapides, le nombre des attitudes est trop restreint. Il faut alors recourir à d'autres applications de la photographie.

1. Ces pellicules agglutinées par leur face non sensible sur des disques d'ébonite, puis taillées circulairement avec des ciseaux, s'introduisent dans le fusil à la façon des glaces sur lesquelles elles présentent plusieurs avantages : d'abord leur extrême sensibilité, puis leur légèreté qui fait que la pellicule et son support ont environ deux fois moins de masse que les glaces de la même dimension. Il s'en suit une plus grande rapidité dans la rotation de la plaque et l'on obtient ainsi un plus grand nombre d'images dans un battement d'ailes.

2. J'ai récemment construit un fusil ne donnant qu'une seule image, mais avec un objectif assez puissant pour que le temps de pose soit réductible au minimum. On obtient ainsi des images isolées, mais bien modelées et assez grandes pour qu'on y puisse saisir tous les détails de l'attitude de l'oiseau représenté. C'est sous cette forme que la photographie instantanée semble le mieux applicable à la détermination des attitudes que prennent les animaux à différents instants de leurs mouvements. Et c'est avec un instrument de ce genre qu'on aurait le plus de chances de recueillir des renseignements curieux sur le vol d'oiseaux qu'on ne peut pas élever en captivité.

Sur le même principe que le fusil photographique, je viens de réaliser un appareil qui donne jusqu'à 50 images distinctes par seconde et dont il sera question au chapitre prochain.

§ 90. **Des photographies sur champ obscur.** — Si un objet vivement éclairé est placé devant un fond obscur, et qu'on en prenne l'image photographique, le moindre mouvement de l'objet pendant le temps de pose déforme l'image ; si le mouvement est étendu, l'on obtient sur la glace sensible une traînée plus ou moins longue qui reproduit fidèlement le trajet suivi par le corps lumineux. Réduisons à un point brillant le corps dont nous voulons avoir la trajectoire ; celle-ci s'inscrira sur la plaque sensible sous la forme d'une courbe très pure qui reproduira les plus délicates inflexions du point brillant.

On conçoit que cette inscription ne puisse se faire que devant un champ absolument noir, de façon que la plaque photographique ne reçoive d'autre impression que celle du point brillant et garde toute sa sensibilité dans les parties que devra successivement parcourir l'image de ce point pendant son trajet. Or, toute surface noire émet encore une certaine quantité de lumière qui suffit, quand la pose est longue, pour voiler l'image obtenue. Chevreul a donné le moyen d'obtenir le *noir absolu*, l'obscurité parfaite, en prenant une caisse percée d'un trou et noircie intérieurement. La lumière qui tombe sur la petite ouverture de la caisse n'étant plus réfléchie au dehors, cette ouverture est d'un noir intense à côté duquel tous les corps matériels, le velours noir lui-même, paraissent colorés, ce qui prouve qu'ils réfléchissent encore certains rayons lumineux.

Je me suis approché autant que possible des conditions signalées par Chevreul en construisant un hangar profond, noirci intérieurement, et tapissé au fond de velours noir. L'ouverture de ce hangar peut être plus ou moins rétrécie au moyen de rideaux et laisse un champ d'autant plus obscur qu'elle est plus étroite.

De petites boules de verre argenté, des boutons ou des tiges de métal poli sont les meilleurs objets à employer pour avoir

des trajectoires bien nettes; on les fixe sur le corps dont on veut connaître le mouvement[1].

§ 91. **Photographies des trajectoires.** — Une Corneille noire fut munie au bout de l'aile, d'une petite bande de papier blanc recourbée en anse et fortement liée à l'extrémité de la première rémige. On fit voler l'oiseau devant le champ obscur;

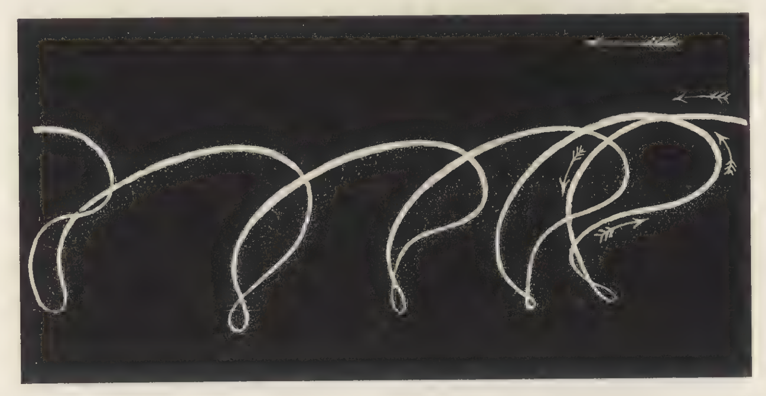


Fig. 72. — Trajectoire photographique de la pointe de l'aile d'une Corneille. L'oiseau vole de gauche à droite. De petites flèches indiquent le sens du mouvement de la pointe de l'aile.

un appareil photographique ordinaire fut tenu ouvert pendant cinq battements d'ailes de l'oiseau. La figure 72 ainsi obtenue est la trajectoire du morceau de papier blanc attaché au bout de l'aile. Quant à l'oiseau lui-même, sa couleur noire le rendait invisible. La trajectoire de l'extrémité de l'aile de la Corneille se lit de droite à gauche, l'oiseau volait dans ce sens. On reconnaît la périodicité des mouvements de l'aile et l'on voit qu'à partir de l'origine du vol, l'intervalle qui sépare deux retours périodiques d'un même mouvement va toujours en s'allongeant, par suite de l'accroissement de la vitesse moyenne de l'oiseau.

La courbe décrite par l'extrémité de l'aile de la Corneille diffère sensiblement de celles que nous ont données, § 79 et § 75, l'aile

1. M. L. Soret de Genève a modifié cette méthode en employant comme corps lumineux de petites lampes à incandescence et en opérant la nuit.

bâtarde de la Buse et l'extrémité inférieure de l'humérus du Pigeon. Outre les différences qui peuvent tenir au genre du vol de la Corneille, nous savons que la trajectoire du bout d'une rémige doit être différente de celle des autres parties de l'aile.

Un caractère commun à toutes les trajectoires que nous avons représentées, c'est qu'elles montrent l'aile se portant en avant dans sa phase d'abaissement. De petites flèches indiquent le sens du mouvement pendant toute la durée du premier coup d'aile.

On voit qu'arrivée au bas de sa course, la pointe de l'aile remonte en formant une petite boucle et en croisant, pendant un instant, le chemin qu'elle a suivi dans la descente.

Ce trajet assez compliqué, surtout quand le mouvement de translation générale s'accentue, n'est pas constant d'une expérience à l'autre, sur un même oiseau. Il n'est guère possible pour le moment d'en tirer grand parti pour l'explication du mécanisme du vol; mais plus tard, ces inflexions diverses prendront un sens, quand on aura vu les effets de la résistance de l'air.

Ce genre d'inscription photographique indique tous les points de l'espace que le bout de l'aile a parcourus, mais il n'exprime pas à quels moments l'aile a passé par ces points. En d'autres termes, la courbe qu'on vient de voir n'exprime que des relations d'espaces et non des relations de temps; elle ne fait connaître qu'une partie des éléments du mouvement. La *photochronographie* donne à elle seule l'expression complète du mouvement.

§ 92. **De la photochronographie.** — Pour introduire la notion de temps dans la trajectoire photographique d'un point lumineux qui se meut devant un champ obscur, il suffit de produire, à des intervalles de temps égaux entre eux et aussi courts que possible, des interruptions dans l'arrivée de la lumière à l'intérieur de l'appareil photographique. Ces éclipses successives se traduisent par des interruptions de la courbe, et celle-ci apparaît formée de points ou de traits juxtaposés, selon la vitesse du mouvement. La figure 73 représente une boule blanche qu'on a lancée devant le champ noir et qui décrit dans l'air sa trajec-

toire parabolique. Une échelle métrique, photographiée sur la plaque même, permet d'estimer la longueur réelle du chemin parcouru par le mobile entre deux admissions successives de la lumière. Il reste à régler exactement les durées de ces intervalles et l'on aura la notion complète de mouvement du projectile.

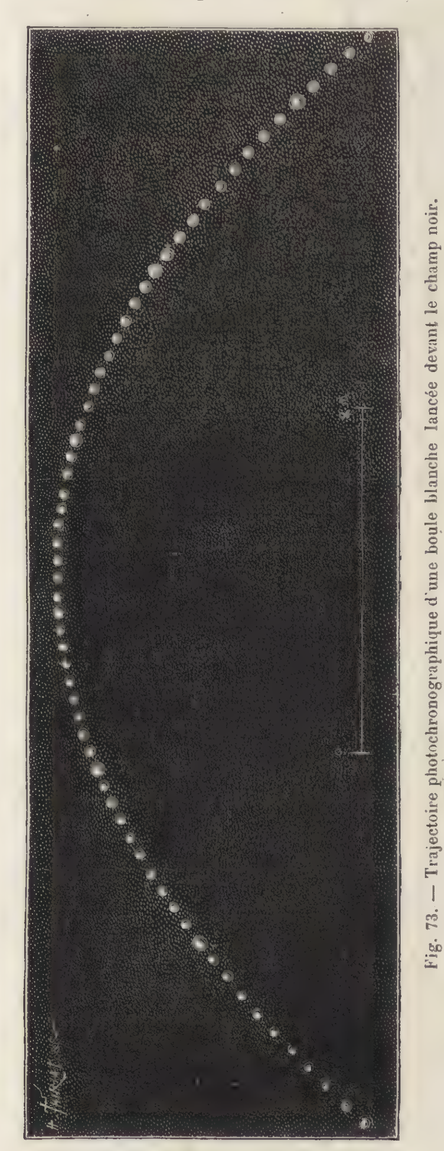


Fig. 73. — Trajectoire photochronographique d'une boule blanche lancée devant le champ noir.

Pour produire des intermittences régulières dans les éclairements, on dispose, au devant de la plaque sensible, un disque opaque présentant des fenêtres longues et étroites percées suivant des rayons. Le disque tourne avec une rapidité connue et d'un mouvement parfaitement uniforme, grâce à l'emploi d'un régulateur. D'après la vitesse de rotation du disque et le nombre des fenêtres, on connaîtra le nombre d'images qui seront prises dans chaque seconde; d'autre part, d'après l'espace angulaire que représentent les fenêtres, on saura la durée du temps de pose. Avec une bonne lumière on peut réduire ce temps à 1/1000, à 1/10000 de seconde, même à une durée plus courte encore, et obtenir de

bonnes images[1]. Cela posé, il est facile d'interpréter la figure 73 et d'y voir non seulement la forme parabolique de la trajectoire suivie par la boule en mouvement, mais l'étendue totale de son parcours, le nombre de centièmes de seconde employés à l'effectuer, enfin les espaces parcourus dans ces intervalles de temps successifs, c'est-à-dire les accélérations et les ralentissements du projectile.



Fig. 74. — Oscillations d'une tige vibrante formant des ventres et des nœuds.

Ce qui vient d'être dit des mouvements d'un point sur sa trajectoire s'applique aussi aux mouvements des différents points d'un même corps sur leurs trajectoires respectives. Agitons devant le champ noir une longue et mince tige de bois blanc, de façon qu'elle forme en oscillant des ventres et des nœuds.

1. Pour les détails de la méthode et la construction des appareils, voir *La Méth. graph.*, *loc. cit.*, p. 25.

L'image photographique (fig. 74) montrera les différentes inflexions de la tige; elle traduira la forme et la position qu'elle occupait dans l'espace à des instants consécutifs.

Tel est le principe de la méthode que j'ai appelée *Photochronographie* et qui, mieux que toute autre, traduit les phases de la locomotion des êtres animés. Je l'ai appliquée à la solution de différents problèmes relatifs à la locomotion de l'Homme et des quadrupèdes [1]; elle se prête non moins bien à l'analyse du vol.

Faisons passer devant le champ noir un oiseau blanc et vivement éclairé; nous obtiendrons des images successives de l'oiseau à des intervalles de temps plus ou moins rapprochés, suivant l'intervalle qui sépare les fenêtres du disque. La figure 75 montre un Goéland volant devant le champ noir; l'oiseau est photographié 10 fois par seconde.

Les images successives montrent alternativement les ailes levées et abaissées; cela tient à ce que le Goéland donnant, à l'essor, à peu près cinq coups d'ailes, et le disque produisant 10 éclairements par seconde, l'aile se trouve saisie dans deux attitudes presque diamétralement opposées. Si le nombre des coups d'ailes de l'oiseau était exactement de cinq par seconde, le retour périodique des attitudes serait absolument régulier et l'on verrait toujours l'aile à des degrés semblables, soit d'élévation, soit d'abaissement; mais comme il n'en était pas ainsi, le nombre des coups d'ailes n'était pas exactement un sous-multiple de celui des éclairements.

Entre les deux positions extrêmes de l'aile représentées sur la figure 75 existaient une infinité d'attitudes intermédiaires qui ne sont pas photographiées, mais qu'on aurait obtenues si les éclairement avaient coïncidé avec d'autres phases des mouvements de l'oiseau.

En multipliant davantage les fenêtres du disque, par exemple en en doublant leur nombre, on aurait obtenu un nombre double

1. *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, passim.

d'images et par conséquent des attitudes intermédiaires à celles qui sont reproduites ici : l'aile se fût montrée au milieu de la phase d'ascension et de celle d'abaissement. En quadruplant le nombre des fenêtres, on aurait eu 8 attitudes pour une révolution de l'aile (fig. 76), mais alors une certaine confusion se serait produite par la superposition partielle de ces images. Nous dirons plus loin comment on peut obtenir un grand nombre d'images, tout en échappant à cet inconvénient.



Fig. 75. — Photochronographies d'un Goéland (10 images par seconde).

§ 93. **De la vitesse de l'oiseau étudiée par la photochronographie.** — Les images photochronographiques montrent encore la vitesse de l'oiseau. Cette vitesse s'estime d'après le chemin parcouru entre deux éclairements successifs, c'est-à-dire en 1/10 de seconde. Prenons au compas la distance qui sépare un même point, le bout du bec par exemple, sur deux images consécutives, et portons cette longueur sur l'échelle métrique : nous verrons qu'elle correspond à 80 centimètres environ, ce qui répond

à une vitesse de 8 mètres par seconde, à l'instant considéré.

Les déplacements de l'oiseau suivant la verticale s'apprécient non moins facilement. Prenons un fil très fin que nous tendrons en l'appliquant sur la figure 75, de manière à le faire passer par l'œil de l'oiseau sur deux images où celui-ci est représenté avec les ailes élevées. Ce fil passera sensiblement au-dessous de l'œil de l'image intermédiaire qui représente l'oiseau avec les ailes abaissées. Par conséquent, l'abaissement



Fig. 76. — Photochronographies d'un Goéland (25 images par seconde).

de l'aile produit une réaction verticale sur le corps de l'oiseau qu'il soulève légèrement. L'étendue de ce mouvement est très faible et la valeur en est difficile à apprécier à cause des proportions réduites de la figure ci-contre, mais elle devient mesurable sur cette même figure agrandie par projection au moyen de la lanterne magique[1].

On voit encore que les espaces parcourus par l'oiseau en 1/10 de seconde vont toujours en augmentant, de l'origine à la fin de la figure. En effet, prenons au compas la longueur comprise

1, Dans ces agrandissements, il est bon d'amener l'image de l'oiseau à ses dimensions véritables ; cela simplifie les mesures des espaces parcourus et celles de la vitesse, puisque toutes les dimensions sont représentées avec leur grandeur réelle sur la figure projetée.

entre les extrémités du bec sur deux images d'oiseaux dans la même attitude; cette longueur, qui représente le chemin parcouru pendant la durée d'un coup d'aile, est de plus en plus grande, du commencement à la fin de la série; ce qui exprime une accélération de la vitesse moyenne du vol. Ainsi, le vol, à partir du moment de l'essor, gagnait peu à peu de la vitesse celle-ci, en trois coups d'ailes, s'est élevée de 8 à 10 mètres par seconde.

Pour comparer la vitesse dans les deux phases opposées du coup d'aile, l'élévation et l'abaissement, on prend, sur une longue série d'images photochronographiques, d'une part la somme des espaces parcourus pendant un certain nombre d'abaissements de l'aile, d'autre part la somme des espaces parcourus pendant le même nombre d'élévations; on voit aussitôt que la première de ces longueurs est sensiblement plus grande que la seconde. Ainsi, l'oiseau gagne de la vitesse pendant l'abaissement de ses ailes; il en perd pendant leur phase d'élévation. Cela confirme les résultats obtenus par les expériences graphiques exposées dans le chapitre précédent.

CHAPITRE X

SUCCESSION DES MOUVEMENTS DU VOL DÉTERMINÉE PAR LA PHOTOCHRONOGRAPHIE

Nécessité de prendre un très grand nombre d'images successives en un temps très court. — Confusion qui tend à se produire par la multiplicité des images; moyens de l'éviter : 1° images alternantes ; 2° dissociation des phases d'un mouvement exécuté sur place. — Méthode du miroir tournant. — Dissociation par déplacement de l'appareil. — Dissociation des images par translation de la surface sensible. — Méthode stroboscopique. — Attitudes successives de l'aile et du corps de l'oiseau, pendant un coup d'aile. — Analyse d'une figure photochronographique. — Reproduction synthétique de l'apparence des mouvements du vol, au moyen du phénakistiscope.

§ 94. **Nécessité de prendre un très grand nombre d'images successives en un temps très court.** — Les figures photochronographiques représentées dans le chapitre précédent ont surtout pour objet de montrer les curieuses attitudes que prennent différentes espèces d'oiseaux pendant le vol; mais la fréquence des images y est trop faible pour permettre de saisir la suite des mouvements de l'aile dans chacun de ses battements.

Le disque obturateur[1] qui a servi aux expériences portait deux fenêtres, et comme il faisait 5 tours par seconde, il en résultait 10 images. En prenant un disque à 5 fenêtres faisant également

1. On appelle *obturateurs* les appareils destinés à admettre pendant un instant très court la lumière dans la chambre photographique. Les éclairements les plus rapides sont ceux qu'on obtient avec un disque percé de fenêtres étroites et tournant avec une grande vitesse. C'est à cette disposition que j'ai recouru dans mon appareil photochronographique (Voir *Méthode graphique*, Appendice, p. 22).

5 tours, le nombre des images est porté à 25 par seconde, ce qui donne déjà des renseignements beaucoup moins incomplets sur les mouvements de l'aile, ainsi que le montre la figure 77.



Fig. 77. — Goéland, vol transversal (25 images par seconde).

Deux révolutions de l'aile sont contenues dans cette figure ; de 5 en 5, elles reproduisent sensiblement les mêmes attitudes.



Fig. 78. — Goéland, vol transversal (50 images par seconde).

Doublons encore le nombre des images, en prenant un disque obturateur percé de 10 fenêtres, nous obtiendrons 50 images par seconde et nous aurons la figure 78, où la transition entre deux attitudes consécutives de l'aile est encore plus facile à saisir.

§ 95. **Confusion qui tend à se produire par la multiplicité des images ; moyen de l'éviter.** — En augmentant le nombre des fenêtres du disque, on accroîtrait pareillement le nombre des images, mais celles-ci, trop rapprochées et superposées en partie les unes aux autres, produisent de la confusion (fig. 79). On échappe à cet inconvénient, au moyen de certains artifices qui vont être décrits.

§ 96. **Images alternantes.** — On les obtient par l'emploi de deux chambres noires et d'un seul disque obturateur. Les chambres, munies chacune de son objectif et de sa plaque sen-

sible, sont braquées sur le même point du champ obscur, et occupent, par rapport au disque, deux positions diamétralement opposées ; enfin, le nombre des fenêtres du disque est impair.

Il est clair que, dans le moment où une fenêtre du disque tournant produira l'éclairement d'un point de la glace de droite, le point similaire de la glace de gauche sera dans l'obscurité et coïncidera précisément avec l'intervalle de deux fenêtres. Quand ce dernier point, à son tour, recevra la lumière, celui du côté droit sera dans l'obscurité.



Fig. 79. — Vol du Goéland (50 images par seconde), confusion qui résulte de la superposition des images.

On aura, de la sorte, deux séries d'images alternantes ; la glace de droite, par exemple, portant les images d'ordre impair, celle de gauche portera celles d'ordre pair. Le diagramme ci-dessous montre dans quel ordre les images devront être lues pour présenter la succession réelle des attitudes de l'oiseau.

Série droite	1				5		7		9		
	\	/	\	/	\	/	\	/	\		
Série gauche		2		4		6		8		10	

La figure 80 donne, sous forme de deux séries alternantes, 10 images successives répondant à un battement et demi des ailes du Goéland. Les flèches et les chiffres indiquent l'ordre

dans lequel se succèdent les images. Ces séries ont été obtenues avec un disque percé d'une seule fenêtre.

Un disque à 3 fenêtres faisant également cinq tours par



Fig. 80. — Goéland, vol transversal. On a superposé l'une à l'autre les deux séries d'images alternantes. Les flèches et les numéros indiquent l'ordre dans lequel se lit la succession des images.

seconde donnerait, dans le même temps, deux séries de quinze images chacune, soit trente attitudes successives.

§ 97. **Dissociation des phases d'un mouvement exécuté sur place.** — L'emploi des images alternantes a pour effet de doubler le temps qui s'écoule entre deux positions successives d'une même série, par conséquent de doubler le chemin parcouru et la distance qui sépare deux images consécutives. C'est ainsi qu'on obtient, sans confusion, deux fois autant d'images qu'on en pourrait recueillir en une seule série continue. Mais la condition absolue pour que l'emploi de cette méthode produise son effet, c'est que l'objet dont on étudie le mouvement change de position apparente dans l'espace. Un oiseau qui battrait des ailes sur place, ou qui volerait dans la direction de l'appareil photographique, formerait toujours ses images au même point de la plaque sensible, dans chacune des séries alternantes.

Pour rendre distinctes les images successives d'un mouvement qui se produit sur place, il y a deux sortes de moyens : l'un consiste à imprimer aux images des déplacements qui les étalent en série sur la plaque sensible; l'autre consiste à déplacer graduellement la surface sensible, afin qu'elle reçoive les impressions successives en des points différents.

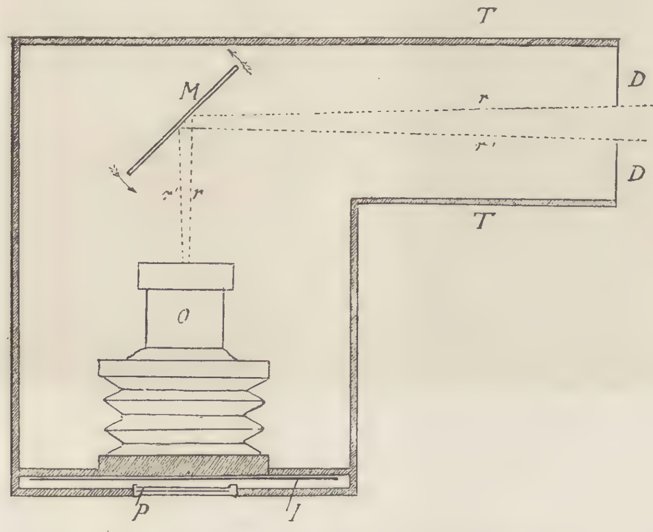


Fig. 81. — Disposition du miroir tournant M, pour la dissociation d'images qui se produisent successivement sur un même endroit de la plaque sensible.

§ 98. **Méthode du miroir tournant.** — Dans une caisse obscure (fig. 81) qui contient tous les appareils[1] est un miroir M qui reçoit les rayons émanés de l'oiseau et les réfléchit dans

1. La caisse est formée de deux compartiments disposés à angle droit (fig. 81). Une ouverture DD, pratiquée dans l'un de ces compartiments, en forme de tube carré TT, reçoit les rayons *rr'* émanés de l'oiseau. Ces rayons tombent sur le miroir M qui les réfléchit dans l'objectif O de l'appareil photochronographique. Un mécanisme d'horlogerie, invisible dans la figure, imprime au miroir M un pivotement vertical dans le sens marqué par les flèches. Le mouvement a pour effet de promener de gauche à droite les images de l'oiseau et de les étaler sur la plaque photographique *p*, dans des positions toujours différentes, à chaque fois que la rotation du disque *l* provoque une nouvelle admission de la lumière dans l'appareil.

l'objectif. Un rouage d'horlogerie règle le mouvement du miroir dont la vitesse doit varier suivant l'écartement que l'on veut donner aux images.



Fig. 82. — Goéland vu suivant l'axe de son vol; dissociation des images par le miroir tournant.

C'est de cette façon qu'a été obtenue la figure 82, qui montre onze attitudes successives d'un Goéland, recueillies pendant la durée d'un seul coup d'aile. L'oiseau se présente par l'avant; il volait donc du côté de l'observateur et un peu vers sa gauche. Sous cette incidence, le déplacement apparent de l'oiseau était donc très faible, de sorte que ses images successives se fussent confondues par superposition, si l'on n'eût employé quelque artifice pour les dissocier.

La série des attitudes représentées commence vers la droite, au moment où l'aile finit son abaissement; on voit ensuite l'aile se ployer, s'élever graduellement, se déployer enfin, et s'abaisser de nouveau.

§ 99. **Dissociation des images au moyen de déplacements imprimés à l'appareil.** — Pour analyser les phases diverses d'un mouvement qui s'exécute sur place, un autre moyen fort simple consiste à faire pivoter l'appareil photochronographique autour de son axe vertical.

Il en résulte un déplacement des images qui s'étalent sur la surface sensible. Dans ce cas, c'est en réalité la glace qui est en mouvement et présente des points différents de sa surface à la série des images. Mais le mouvement que la main imprime à l'appareil ne saurait être uniforme, et les images se suivent à des intervalles fort inégaux[1]; l'emploi du miroir tournant est donc préférable.

On pourrait cependant faire à tous ces procédés un reproche commun, c'est qu'ils communiquent à l'image un mouvement de translation qui, malgré la brièveté du temps de pose, peut altérer sensiblement la netteté des contours. La méthode qui va être décrite échappe à cet inconvénient.

§ 100. **Dissociation des images au moyen d'une translation imprimée à la surface sensible.** — Le déplacement intermittent de la surface sensible est justement le principe sur lequel est basée la construction du fusil photographique (§ 88). Mais dans tout mouvement rapide et intermittent à la fois, la difficulté consiste à arrêter soudainement une masse animée d'une grande vitesse. C'est là ce qui réduisait le nombre des images du fusil à dix ou douze par seconde, même quand on remplaçait les glaces photographiques par des pellicules de gélatine montées sur de minces rondelles d'ébonite.

J'essayai d'obtenir, sur une longue bande de papier sensible, des séries d'images se suivant à très courts intervalles. Cette bande devait s'arrêter pendant chacun des éclairements, car il ne fallait pas songer à prendre des photographies sur une surface animée d'un mouvement continu dont la vitesse devait atteindre environ un mètre par seconde; les contours des images eussent été trop confus[2].

1. Le véritable danger de cette méthode, c'est qu'elle expose à une détérioration de l'appareil. Le disque fenêtré, animé d'un mouvement extrêmement rapide, tend à conserver son plan de rotation, malgré le déplacement qu'on lui imprime; il en résulte un effort latéral qui peut fausser l'axe du disque.

2. Pour avoir une idée de cette confusion, imaginons que le temps de pose soit de 1/1000 de seconde; la bande de papier sensible, défilant avec

Avec d'assez grandes difficultés pour réduire au minimum l'inertie des pièces de l'appareil et les chocs qui en résultent, j'ai réussi à obtenir des séries de cinquante images par seconde recueillies sur une bande de pellicule au gélatino-bromure d'argent, animée d'une translation rapide[1].

La *planche I* a été obtenue en juxtaposant cinq tronçons de cette bande. Elle porte 26 images qui ont été disposées en trois séries correspondant chacune à un battement d'ailes du Pigeon. La première série commence par l'image située en bas et à gauche de la planche ; la cinquième série contient 6 images. Une demi-seconde a suffi pour recueillir ces 26 images ; le temps de pose, pour chacune d'elles, était de 1/4000 de seconde.

Un fil vertical, tendu devant le fond noir sur lequel se détache l'oiseau, sert à apprécier sa vitesse de translation horizontale. La première série d'images a pour repère le fil I ; la deuxième série a pour repère le fil II, et ainsi de suite. On voit que, de 1 à 26, le Pigeon s'approche d'abord de plus en plus de la ligne de repère, l'atteint, puis la dépasse. Or, en mesurant, d'après ces repères, la distance parcourue par l'œil de l'oiseau dans le sens horizontal, on a le moyen d'apprécier sa vitesse moyenne, à chaque cinquantième de seconde.

§ **101. Méthode stroboscopique**[2]. — Cette troisième méthode

une vitesse d'un mètre à la seconde, parcourra un millimètre pendant la pose. Or les images photochronographiques, pour être nombreuses, doivent être très petites; 1/2 centimètre de diamètre est une dimension assez convenable : il s'ensuivrait que le traînage du papier pendant la formation de l'image amènerait une incertitude de 1/5 dans la position du contour extérieur des objets représentés.

1. L'intervalle entre deux images consécutives était 18 millimètres ; le nombre des images, cinquante par seconde. La vitesse moyenne du papier était donc 18×50 millimètres ou 900 millimètres par seconde. La somme des cinquante arrêts du papier représentait, à elle seule, moitié du temps, de sorte que, pendant la translation, la vitesse moyenne était d'environ $1^m,80$ à la seconde.

2. La *Stroboscopie* a pour objet d'analyser les mouvements périodiques, en les observant à des instants très courts séparés les uns des autres par un intervalle presque égal à la durée de la période du phénomène. Cette méthode dérive des expériences déjà anciennes de Savart et surtout des

pour obtenir un grand nombre d'attitudes successives dans un battement d'ailes est basée sur la différence de phase qui existe entre les mouvements de l'aile et ceux du disque fenêtré.

Si la succession des éclairements donnait cinq images par seconde, et que l'aile battît 5 fois dans le même temps, les ima-



Fig. 83. — Images classées stroboscopiquement.

ges successives représenteraient l'oiseau toujours dans la même attitude. Mais si chaque battement d'aile dure *un peu moins* que l'intervalle des éclairements, chaque image montrera l'aile à une phase de son battement *un peu plus* avancée que l'image précédente. Si l'aile, par exemple, bat 11 fois pendant la durée de 10 éclairements, on aura 10 images successives, chacune correspondant à une phase plus avancée que la précédente, de 11/10 de battement; c'est de cette façon qu'a été obtenue la figure 83[1].

belles études de Plateau. L'appareil nommé *phénakistiscope*, et dont on a fait un jouet, est une application bien connue de la stroboscopie.

Tœpler, en 1866, a montré qu'un disque tournant, percé de trous à travers lesquels on regarde un corps en mouvement périodique, une tige vibrante par exemple, permet d'analyser optiquement les vibrations, et d'en déterminer le nombre quand on connaît celui des impressions visuelles, c'est-à-dire le nombre des trous qui ont passé devant l'œil en un temps donné.

L'appareil photochronographique jouit des mêmes propriétés pour l'analyse des mouvements périodiques, avec cet avantage qu'il donne des images permanentes, au lieu des impressions visuelles fugitives qu'on obtient avec les appareils antérieurement employés.

1. Dans cette figure, on a mis bout à bout les images qui représentent les phases successives du coup d'aile, sans se préoccuper de placer l'oiseau dans la position qu'il occupait réellement dans l'espace, à chacun des instants représentés. Cela eût exigé beaucoup d'espace, car l'intervalle entre deux images consécutives étant 11/10 d'un battement, la longueur totale de la figure aurait correspondu au parcours de l'oiseau pendant $11 \times \frac{11}{10}$ c'est-à-dire 12 battements d'ailes.

Si la durée d'un battement d'ailes excède l'intervalle de deux éclairements, chaque image montre l'aile de l'oiseau à une phase moins avancée que la précédente, de sorte qu'en disposant les images en série suivant l'ordre où elles se produisent, on obtient une expression rétrograde du mouvement. Ainsi, dans la figure 84, un Pigeon est représenté avec ce sens rétrograde du



Fig. 84. — Pigeon, vol ascendant; les images successives se suivent dans l'ordre inverse du mouvement réel.

mouvement, si l'on suit les images dans le sens du vol, c'est-à-dire d'arrière en avant. Tandis que si l'on commence par la dernière attitude (en haut et à gauche) et si l'on suit la série des images en sens inverse de la direction du vol, on trouve, dans leur ordre véritable de succession, les différentes phases de l'abaissement des ailes.

La série de six images représentée ci-dessus ne correspond guère qu'à la moitié d'un battement d'ailes, à la phase d'abaissement; il eût fallu à peu près douze images pour représenter le battement complet[1].

En somme, la méthode stroboscopique a pour effet de donner

1. D'une manière générale, si l'on prend la seconde pour unité de temps, que a soit le nombre des éclairements de la plaque, b le nombre de battements d'ailes en cet espace de temps, la quantité constante dont

des images très nombreuses et très espacées exprimant les phases successives d'un mouvement périodique[1].



Fig. 85.



Fig. 86.

Les différentes méthodes qui viennent d'être exposées ont pour but de déterminer, chez les diverses espèces d'oiseaux, les actes successifs qui constituent un coup d'aile.

§ **102. Attitudes successives des ailes et du corps de l'oiseau pendant un coup d'aile.** — La série des onze figures suivante représente, en projection verticale, les images successives d'un Pigeon pendant la durée d'un coup d'aile. Bien que ces figures soient plus explicites que le langage pour définir les changements d'attitude de l'oiseau, j'essayerai cependant de caractériser en quelques

s'augmentera à chaque tour l'intervalle qui sépare un éclairement du battement consécutif sera $\frac{a-b}{ab}$. La valeur positive ou négative de la quantité $b-a$ correspond à une avance ou à un retard du battement sur l'éclairement. A la limite, b et a étant égaux, le retard exprimé par le numérateur $b-a$ est nul, et l'éclairement se fait en même temps que le battement.

La fraction de révolution de l'aile qui s'effectue entre deux éclairements consécutifs de la plaque sera de même $\frac{a}{b}$.

1. Les phases peuvent être très espacées puisque, entre deux images consécutives, il peut s'écouler une ou plusieurs périodes entières augmen-

mots la phase à laquelle correspond chacune d'elles. Les six premières appartiennent à l'abaissement, et les cinq dernières à l'élévation des ailes.



Fig. 87.

Fig. 85. On a choisi arbitrairement, pour origine du coup d'aile, l'instant où commence son abaissement. Les deux ailes sont largement déployées, et l'on voit que les rémiges s'infléchissent déjà sur la résistance de l'air.



Fig. 88.

Fig. 86. La torsion de l'aile par la résistance de l'air est encore plus marquée ; l'oiseau étale largement sa queue et laisse pendre ses pattes.



Fig. 89.

Fig. 87. L'abaissement des ailes continue, avec la torsion des rémiges. L'aile gauche est vue en raccourci, mais la droite montre à la fois sa face inférieure et sa face supérieure, par suite de la torsion qu'elle éprouve. On voit aussi

tées d'une fraction de période. Ces phases peuvent être très nombreuses, puisque le nombre des images représentées en série sera d'autant plus grand que la fraction qui s'ajoute au nombre entier de périodes contenues entre deux images successives est plus petite.

que les ailes se portent en avant et commencent à s'approcher l'une de l'autre.

Fig. 88. La torsion de l'aile commence à diminuer par suite du ralentissement de la descente, mais l'adduction se prononce encore.



Fig. 90.

Fig. 89. Les ailes continuent à se rapprocher l'une de l'autre; leurs faces internes se regardent.



Fig. 91.

Fig. 90. L'adduction est à son maximum. Sur des images prises d'en haut, en projection horizontale, on verra que les pointes des ailes arrivent à se toucher en avant de la poitrine de l'oiseau.



Fig. 92.

Fig. 91. Commencement de la phase de remontée; l'oiseau a tout le corps enfermé entre ses ailes; sa tête seule apparaît un peu, à leur bord supérieur. L'angle obtus que les ailes font, en haut et en arrière de la tête, correspond à la région carpienne qui commence à se plier.

Fig. 92. Les articulations de l'aile sont fléchies et les grandes rémiges se portent en dehors; en même temps qu'elles pivotent sur elles-mêmes et laissent passer l'air dans leurs intervalles.

Fig. 93. L'abduction de l'aile se prononce de plus en plus ; les rémiges sont franchement séparées les unes des autres ; le bord antérieur de l'aile s'élève. Pendant ce temps et pendant celui qui précède, les articulations du coude et du carpe sont fléchies.

Fig. 94. On voit l'élévation de l'aile s'accentuer davantage ; ses articulations s'étendent, et celle du carpe, qui est seule visible, forme déjà un angle plus obtus que dans les images précédentes. Les rémiges recommencent à se rapprocher les unes des autres.

Fig. 95. Ici les ailes, tout à fait relevées et étendues, se touchent par leur face dorsale ; c'est à ce moment que se produit le choc sonore signalé par Virgile. Les pattes sont pendantes encore à cet instant final de la remontée de l'aile ; l'oiseau les retirera brusquement au début de la phase prochaine qui commencera le battement suivant.



Fig. 93.



Fig. 94.



Fig. 95.

§ 103. **Analyse d'une photochronographie.** — Soit, figure 96, une série d'images d'un Goéland dans un vol descendant.

La ligne qui passe par le milieu du corps des deux images extrêmes représente l'*axe du vol;* l'échelle métrique horizontale, placée au-dessous de la figure, montre que cet axe fait, avec l'horizon, un angle de 9° environ.

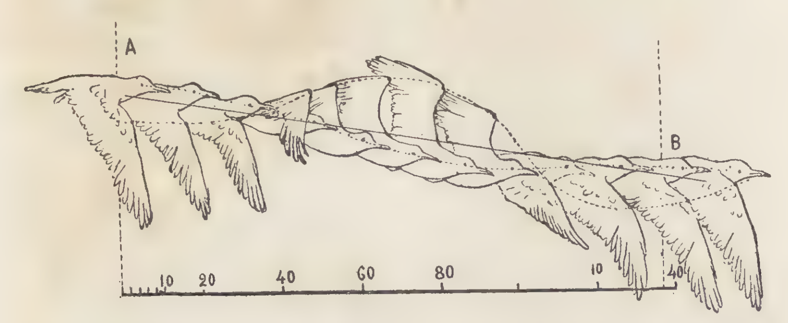


Fig. 96. — Goéland, vol descendant suivant l'axe AB. L'échelle métrique exprime en centimètres les espaces parcourus horizontalement à chaque instant.

Fréquence des battements de l'aile. — Le nombre des images contenues dans une révolution de l'aile, entre A et B, est de dix et une fraction, ce qui, à raison de cinquante images par seconde, donne pour un battement complet, ou révolution de l'aile, 1/5 de seconde environ.

Vitesse de l'oiseau. — Mesuré sur l'échelle métrique, le parcours de l'oiseau pendant un battement d'ailes est de $1^m,371$, soit $6^m,82$ par seconde, ou 411 mètres à la minute ou 24 kil. 660 mètres à l'heure. Cette vitesse est faible, pour un bon volateur; mais n'oublions pas que les images ont été prises au début du vol, au moment où le Goéland vient d'être lâché et prend péniblement son essor. Du reste, quand on examine une longue série d'images, on voit la vitesse s'accélérer sensiblement, du commencement à la fin de la figure.

Si l'on veut apprécier les variations périodiques de la vitesse pendant la durée d'un coup d'ailes, il faut choisir, sur chaque image, un même point qui ne soit jamais caché, quelle que soit la position de l'aile; l'œil de l'oiseau est un très bon

point de repère pour ces mesures. La vitesse estimée d'après l'espace parcouru entre deux éclairements consécutifs, c'est-à-dire en 1/50 de seconde, se mesure, soit sur la trajectoire de l'œil, soit sur la projection horizontale de cette trajectoire. En adoptant cette dernière mesure, on trouve les valeurs suivantes : *maximum* $0^m,16$ en $\frac{1}{50}$ de seconde, soit 8 mètres à la seconde; *minimum*, $0^m,12$ dans le même intervalle de temps, soit 6 mètres à la seconde. La vitesse atteint son maximum à la fin de l'abaissement de l'aile, son minimum à la fin de la remontée.

Oscillations verticales du corps. — Mesurées d'après le déplacement de l'œil, au-dessus et au-dessous de l'axe du vol, ces oscillations ont une amplitude de $0^m,08$, soit $0^m,04$ de chaque côté de cet axe. Les deux phases, soit positive, soit négative, de l'oscillation ont sensiblement la même durée, car toutes deux contiennent le même nombre d'images. La phase positive, ou convexe par en haut, correspond à l'abaissement de l'aile; la phase négative ou convexe par en bas, à son relèvement.

Changements d'inclinaison du corps. — L'axe longitudinal de l'oiseau, c'est-à-dire la droite qui le traverserait du bec à l'extrémité de la queue, est sensiblement horizontal dans l'intervalle des deux oscillations dont nous venons de parler. Mais pendant l'abaissement de l'aile, l'extrémité antérieure de l'axe du corps se relève légèrement; elle s'abaisse au contraire, quand l'aile remonte.

Trajectoire de l'aile. — Comme les articulations du coude et du carpe s'ouvrent et se ferment tour à tour; comme d'autre part la surface des rémiges se courbe et s'incline en sens divers, il est nécessaire de spécifier le point dont on veut déterminer la trajectoire. Le carpe est celui que j'avais choisi dans certaines expériences graphiques (§ 79); nous le suivrons également sur les images photographiques, il y est en effet toujours visible[1].

1. Ce point présente encore un intérêt particulier : c'est d'être très voisin du centre d'action de l'air sur l'aile, ainsi qu'on le verra plus tard.

On a indiqué, sur chaque image, la position du carpe au moyen d'un point; puis, en joignant tous ces points entre eux, on a obtenu une courbe sinueuse que l'axe du vol partage assez inégalement : la partie située au-dessus de cet axe est en effet notablement plus grande que celle qui est au-dessous.

Cette énumération des renseignements fournis par les photochronographies pourrait être complétée par l'indication des trajectoires de différents autres points du corps, mais cela n'aurait pas d'intérêt pour le moment. Il suffit d'avoir montré comment on peut tirer de ces images les éléments nécessaires pour une étude cinématique du vol des oiseaux.

§ 104. **Reproduction synthétique de l'apparence des mouvements du vol au moyen du phénakistiscope.** — Tout le monde connaît l'ingénieux instrument imaginé par Plateau et auquel il a donné le nom de phénakistiscope. Il est formé d'un disque tournant sur son axe et à la circonférence duquel sont tracées une série d'attitudes correspondant aux différentes phases du mouvement qu'on veut reproduire. Ce disque est placé devant un miroir qui en renvoie l'image, et l'observateur regarde par une série de trous à travers lesquels il perçoit les images représentées dans la série des attitudes successives de l'objet. La persistance des impressions lumineuses sur la rétine fait que cet objet paraît exécuter des mouvements continus à retours régulièrement périodiques.

Les onze images représentées fig. 97 ont été agrandies et disposées circulairement sur un disque de carton. Des fenêtres convenablement espacées ont été percées dans le disque et celui-ci, mis en mouvement devant un miroir, a donné l'illusion parfaite d'un oiseau qui bat des ailes.

On sait que, pour avoir une sensation visuelle continue au moyen d'impressions successives, il faut que ces impressions se renouvellent environ 10 fois par seconde. Le disque ci-dessus représenté donne donc l'illusion d'un mouvement continu, à la condition de faire un tour à la seconde. Or, si chaque tour du disque fait assister l'observateur à toute la série des phases d'un

battement d'ailes, et s'il faut une seconde pour que cette série se déroule, le mouvement qu'on aperçoit dans le phénakistiscope est 5 fois plus lent, et par conséquent plus facile à observer, que



Fig. 97. — Onze images du vol d'un Goéland, disposées pour le phénakistiscope.

dans la nature, puisque le Goéland donne cinq coups d'ailes par seconde.

Avec un plus grand nombre d'images, et un plus grand nombre de fenêtres, on pourrait produire l'illusion d'un mouvement continu, tout en ralentissant plus encore les mouvements apparents de l'oiseau. C'est ce ralentissement des mouvements qui rend précieux l'emploi de phénakistiscope, en permettant à l'œil de suivre facilement toutes les phases d'un acte qui échapperait à l'observation directe. Peu à peu, on imprime au disque une

rotation plus rapide, et l'œil, familiarisé avec le mouvement qu'il vient d'observer, continue à en discerner les phases, malgré leur brièveté croissante. On arrive de la sorte à faire l'éducation de sa vue, et l'on saisit bientôt, dans l'observation directe des mouvements des êtres animés, certains détails qui échappaient auparavant.

C'est ce que j'ai constaté sur moi-même, à propos des allures du cheval, de la course de l'homme et même du vol de certains oiseaux.

CHAPITRE XI

MOUVEMENTS DE L'OISEAU SUIVANT LES TROIS DIMENSIONS DE L'ESPACE

Insuffisance des images projetées sur un seul plan, pour exprimer les diverses attitudes de l'oiseau. — Dispositions que l'on doit prendre, pour photographier à la fois trois séries d'images projetées sur trois plans différents. — Tableau synoptique des attitudes successives d'un oiseau, projetées sur trois plans. — Figures en relief des attitudes d'un Goéland construites d'après les trois séries de projections. — Images photochronographiques de l'oiseau recueillies sous des incidences variées. — Images en relief des attitudes successives d'un Pigeon, pendant un battement d'ailes. — Adaptation des figures en relief au zootrope. — Les mouvements de l'oiseau peuvent être exactement déterminés par les méthodes actuelles de la physiologie expérimentale. — Résumé des principaux faits que l'expérimentation a révélés relativement à la nature des mouvements du vol ramé.

§ 105. **Insuffisance des images projetées sur un seul plan, pour exprimer les diverses attitudes de l'oiseau.** — Les figures données par la photochronographie ne montrent pas la véritable trajectoire de l'aile de l'oiseau, mais la projection de cette trajectoire sur un plan vertical. C'est, en quelque sorte, une vue perspective des mouvements de l'aile, dont l'axe est toujours plus ou moins obliquement dirigé vers l'observateur, parfois même tout à fait *en raccourci*.

On aurait une idée moins imparfaite des véritables attitudes de l'aile si l'on prenait à la fois deux séries d'images stéréoscopiques[1], mais ces photographies, tout intéressantes qu'elles seraient, puisqu'elles donneraient la sensation du relief pour les

1. Je viens de faire construire, à cet effet, un instrument spécial.

différentes phases du coup d'aile, se prêteraient mal à des mesures précises.

J'ai cru mieux faire, en prenant à la fois trois séries d'images dans lesquelles les attitudes de l'oiseau, projetées sur trois plans différents, permettraient de construire la trajectoire d'un point quelconque suivant les trois dimensions de l'espace[1].

§ 106. Dispositions que l'on doit prendre pour photographier à la fois trois séries d'images projetées sur trois plans différents. — Cherchons d'abord à préciser les conditions idéales de cette expérience.

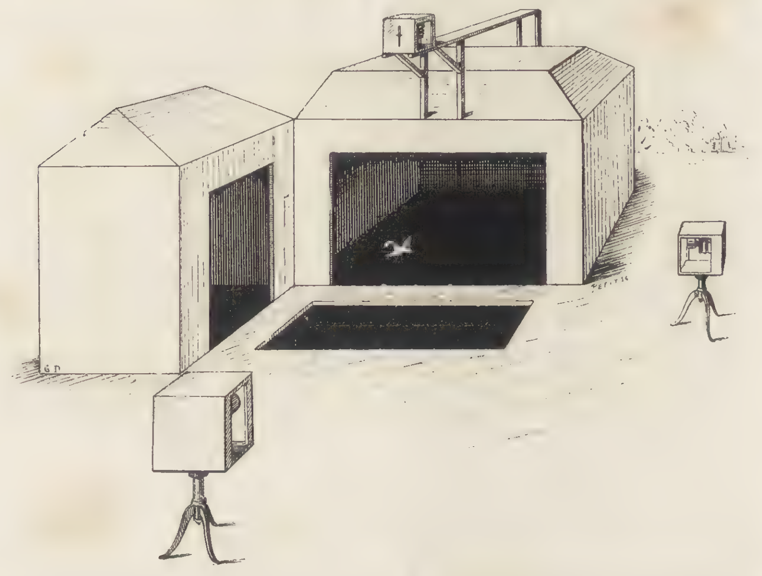


Fig. 98. — Disposition de trois champs obscurs et de trois appareils photochronographiques, pour obtenir simultanément trois séries d'images projetées sur trois plans perpendiculaires entre eux.

L'oiseau volant en pleine lumière, il faudrait braquer sur lui trois appareils photochronographiques (fig. 98), semblables

1. Les projections photochronographiques de l'oiseau sur un plan vertical parallèle à l'axe du vol, c'est-à-dire telles qu'on les a vues dans les figures précédentes, sont toutefois suffisantes pour montrer les déplacements du corps produits par l'action symétrique des ailes, ses oscillations, ses accélérations et ses ralentissements; or ce sont les indications les plus importantes pour le problème dynamique du vol.

entre eux et bien réglés, de manière à donner le même nombre d'images dans le même temps. Bien plus, le synchronisme devrait être établi entre les appareils, de sorte que, dans tous trois, les images se formassent au même instant. Enfin trois champs obscurs seraient disposés de telle façon que l'oiseau, vu simultanément de trois points différents, se projetterait sur chacun de ces champs. Un dispositif électro-magnétique ouvrirait et fermerait simultanément les trois appareils photochronographiques.

Ainsi, outre l'instrument, avec son champ obscur, qui a servi aux expériences déjà décrites, il en faudrait deux autres, avec leurs champs respectifs. Un de ces nouveaux appareils serait suspendu à une quinzaine de mètres de hauteur, pour prendre des images de l'oiseau vu d'en haut, tandis que le champ obscur correspondant à cet appareil serait formé par une tranchée profonde, creusée dans le sol et noircie intérieurement, de telle sorte qu'elle ne pût recevoir ni émettre aucune lumière.

Le troisième appareil photochronographique serait braqué en avant de l'oiseau, sur le prolongement de l'axe du vol ; il occuperait donc l'une des extrémités de la tranchée, tandis qu'à l'autre extrémité, un hangar profond, noirci intérieurement, constituerait le troisième champ obscur. Ce hangar serait donc orienté à angle droit avec celui qui a servi aux précédentes expériences.

Comme l'installation qui vient d'être décrite présentait certaines difficultés matérielles, j'ai dû me contenter d'une disposition plus simple, mais nécessairement moins parfaite. En procédant *par expériences successives*, j'ai recueilli trois séries d'images photochronographiques :

1° Une série projetée sur un plan vertical *parallèle à l'axe du vol*, comme dans les figures déjà connues;

2° Une série projetée sur un plan vertical à peu près *perpendiculaire à l'axe* du vol comme dans la figure 99[1].

1. On n'a pas pris les images tout à fait perpendiculairement à l'axe du vol, dans la figure 99, afin d'éviter la confusion qui se produit lorsque ces

A cet effet, on a porté le Goéland au fond du hangar obscur, d'où on l'a laissé s'envoler. Dès que l'oiseau émergea dans la lumière, on en prit les photographies. Cette expérience, maintes fois répétée, a fourni des séries d'images dans lesquelles la direction du vol a beaucoup varié suivant les caprices de l'oiseau. Ces images, diversement orientées, sont fort instructives à étudier; elles se complètent l'une par l'autre et donnent, sur les mouvements des ailes, tous les enseignements qu'on peut souhaiter.



Fig. 99. — Images du vol d'un Goéland vu de face.

3° Pour obtenir la troisième série d'images, celle qui montre les mouvements de l'oiseau projetés sur un plan horizontal, l'appareil photochronographique devrait dominer d'une douzaine de mètres le plan dans lequel volait l'oiseau. Voici la disposition que j'ai adoptée.

Quatre hautes poutres de sapin, profondément fichées en terre et solidement assemblées entre elles, forment une charpente pyramidale de 14 mètres de hauteur, praticable intérieurement au moyen d'échelles. Sur cette charpente, un plancher horizontalement suspendu à 12 mètres au-dessus du sol porte l'ap-

images se recouvrent. Dans d'autres cas, pour recueillir une série de ce genre, j'ai recouru, avec beaucoup d'avantage, au moyen précédemment décrit § 98, pour dissocier les mouvements qui se font sur place.

pareil photochronographique, avec l'objectif tourné en bas. Enfin, pour former en dessous un fond obscur, une bande de velours noir est étendue sur le sol. Cette bande a 11 mètres de long sur $2^m,50$ de large, et des écrans verticaux projettent leur ombre sur le noir du velours. Ce champ obscur, bien imparfait

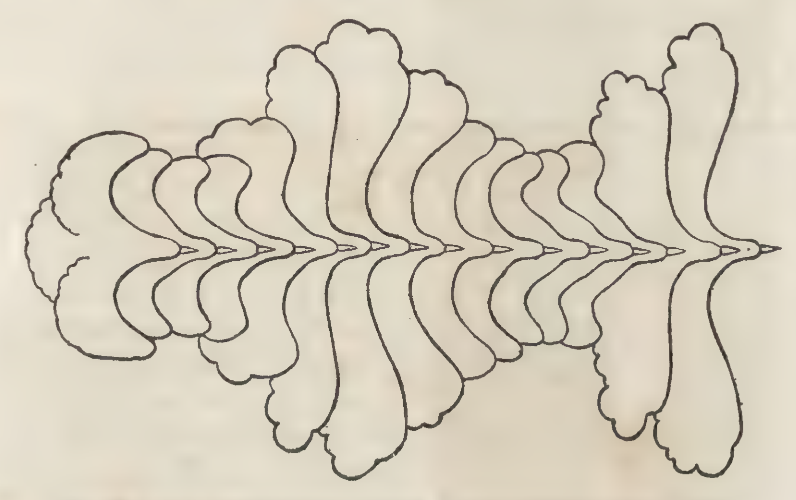


Fig. 100. — Images successives d'un Goéland, vu d'en haut (25 images par seconde).

sans doute, fut à peu près suffisant pour donner des images lisibles. J'en tirai un décalque (fig. 100) qui montre assez clairement la manière dont l'aile s'étend et se resserre aux différentes phases de son battement.

La grande fréquence des éclairements et l'imperfection du champ obscur sont, dans ce cas, les causes de l'imparfaite netteté des images; en diminuant le nombre des fenêtres on a déjà des figures meilleures (fig. 101), mais des renseignements moins complets[1].

Il s'agit maintenant de combiner entre elles ces trois séries

1. La figure 101 montre à quel point les actes de vol peuvent quelquefois être asymétriques; le corps, le cou, les ailes de l'oiseau s'y présentent avec les torsions les plus variées. Je me hâte d'ajouter que cette asymétrie si prononcée est exceptionnelle.

d'images, de manière à montrer l'attitude de l'oiseau rapportée, à chaque instant, aux trois dimensions de l'espace. Le tableau de la figure 102 montre ces trois sortes de projections groupées de façon à en faire saisir les concordances.

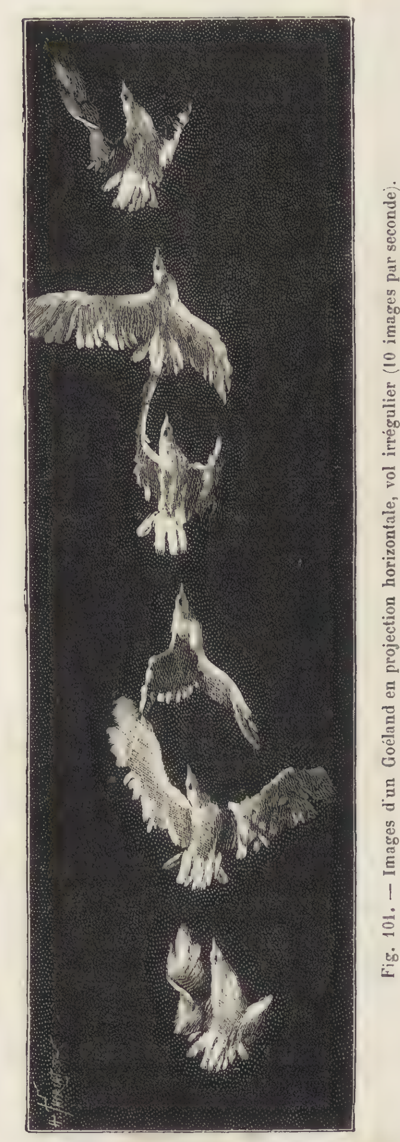


Fig. 101. — Images d'un Goéland en projection horizontale, vol irrégulier (10 images par seconde).

§ 107. **Tableau synoptique des attitudes sucessives d'un oiseau, projetées sur trois plans différents.** — La série A montre 10 images du Goéland en projection sur un plan horizontal; la série B représente les mêmes attitudes de l'oiseau projetées sur un plan vertical parallèle à l'axe du vol; enfin la série C est formée par la projection de ces attitudes sur un plan vertical oblique par rapport à l'axe du vol.

Le lecteur reconnaît sans doute aisément les images des séries A et B respectivement empruntées aux figures 100 et 78; mais les images d'une même série ont été plus écartées les unes des autres, afin de les rendre plus distinctes. L'espace réellement parcouru par l'oiseau était six fois moindre que celui qui existe, dans le tableau 102, entre deux attitudes consécutives. Toutefois, la valeur relative des espaces parcourus est conservée, de façon qu'on puisse

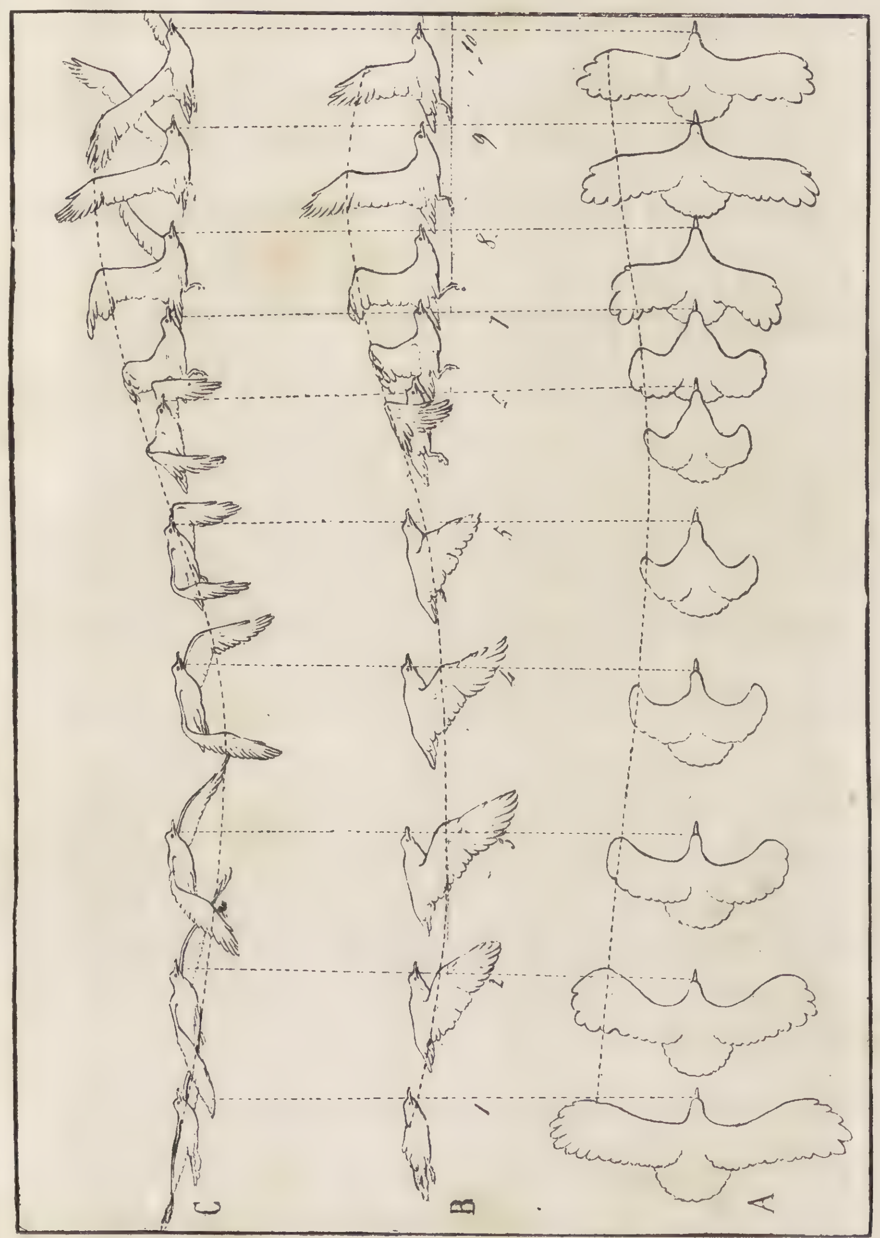


Fig. 102. — Tableau synoptique des attitudes successives d'un Goéland au vol projetées sur trois plans différents.

juger, d'après l'écartement ou le rapprochement des images, de l'accélération ou du ralentissement qui se produit aux différentes phases du coup d'aile.

Les lignes verticales et numérotées qui réunissent les images des trois séries ont pour but de guider l'œil dans l'appréciation du synchronisme entre ces images.

Ce tableau n'a pas besoin d'être longuement commenté : le lecteur peut se rendre compte de la véritable position de l'aile à chaque instant, en examinant les figures qui expriment cette attitude sous trois aspects différents.

Chacune des trois séries porte dix images prises à des intervalles de temps égaux et représentant, dans leur ensemble, le cycle des mouvements qui se produisent à chaque coup d'aile. On a choisi arbitrairement, pour début de la période, l'instant où l'oiseau, vu d'en haut (série A), présente la plus large envergure[1] ; à ce premier instant, l'aile est à peu près au milieu de sa phase d'abaissement et horizontalement tendue (série B) ; à ce moment aussi, le mouvement est si rapide que la résistance de l'air soulève la pointe des rémiges (série C).

Dans les images suivantes, l'abaissement de l'aile se continue et le carpe se porte de plus en plus en avant, jusqu'au moment où la remontée commence (ligne 4) ; le carpe se fléchit alors et les rémiges pendent verticalement. La flexion du coude, qui s'opère en même temps, diminue encore l'envergure de l'oiseau, de sorte que les ailes se serrent contre le corps pendant les premiers temps de leur remontée (jusqu'à la sixième ligne). A partir de cet instant, le déploiement de l'aile commence ; le coude et le carpe s'étendent à la fois, jusqu'au déploiement

1. La série A ne donne vraisemblablement pas la mesure exacte de l'envergure de l'oiseau. En effet, l'aile du Goéland se termine, dans la plupart des images, par des contours arrondis qui appartiennent à des plumes tectrices et non aux rémiges primaires dont la pointe est plus effilée. Mais l'oiseau qui a servi dans ces expériences avait les rémiges de couleur un peu foncée ; elles n'ont pas donné leur image sur le fond imparfaitement obscur dont je disposais.

complet (neuvième ligne). Alors l'aile va s'abaisser de nouveau[1].

Dans la série A, une courbe ponctuée montre que la projection des mouvements du carpe sur un plan horizontal présente, par rapport à l'axe du vol, son écart *maximum* sur la ligne 1, c'est-à-dire au milieu de l'abaissement de l'aile ; tandis que le *minimum* d'écart de cette courbe correspond au commencement de la remontée, c'est-à-dire aux lignes 5 et 6.

Dans les séries B et C, la courbe des déplacements du carpe, projetée sur un plan vertical, oscille autour de l'axe du vol qu'elle coupe deux fois pendant la révolution de l'aile. Ces intersections coïncident avec les *maxima* et les *minima* d'écart de la courbe des mouvements du carpe en projection horizontale.

En combinant entre elles ces trajectoires projetées sur trois plans perpendiculaires entre eux, on déterminera les déplacements successifs du carpe, suivant les trois dimensions de l'espace. La courbe résultante ne saurait être exprimée que par les inflexions d'une tige solide[2].

La même nécessité s'imposant pour tous les points de l'aile dont on veut déterminer la trajectoire dans l'espace, il s'ensuit que l'impression complète des mouvements du vol ne peut être donnée que par une figure solide. C'est ce qui m'a conduit à recourir au modelage, pour représenter par des figures en relief les attitudes successives de l'oiseau.

§ 108. Figures en relief des attitudes d'un Goéland, construites d'après trois séries de projections. — Pour rendre plus

1. Comme l'insuffisance de mon installation ne m'a pas permis de recueillir simultanément les photochronographies sur trois plans perpendiculaires entre eux, on ne doit pas s'attendre à recontrer une parfaite concordance entre les trois images qui portent le même numéro d'ordre. Toutefois l'imperfection doit être assez légère, car si l'on réunit par des lignes ponctuées dans chaque série les positions successives de l'articulation radio-carpienne, la courbe résultante présente, dans les trois séries, des inflexions assez régulières (fig. 102).

2. C'est à ce procédé que Carlet a recouru pour représenter la trajectoire du pubis et celle du grand trochanter d'un homme qui marche ou qui court.

facilement intelligibles les attitudes successives du vol, j'en ai modelé les images en relief. Chacune de ces figurines représente l'oiseau dans la position qu'il avait, à chacun des instants où il a été photographié, c'est-à-dire à des intervalles de temps de 1/50 de seconde. Ces maquettes, modelées d'abord en cire, ont été ensuite coulées en bronze par le procédé dit *à cire perdue*. En les disposant en série, suivant l'ordre dans lequel se succèdent les mouvements, on obtient l'aspect représenté fig. 103. Chaque image représente l'attitude de l'oiseau pendant la courte durée de l'éclairement qui a impressionné la plaque, c'est-à-dire environ pendant 0,0005 de seconde.

Cette série forme un cycle complet, embrassant toutes les phases d'un battement des ailes, depuis le moment où, complètement étendues et élevées à leur maximum, elles s'apprêtent à s'abaisser, jusqu'à celui où elles ont achevé leur remontée et vont revenir à leur position initiale.

Il faut noter que si les attitudes successives sont exactement

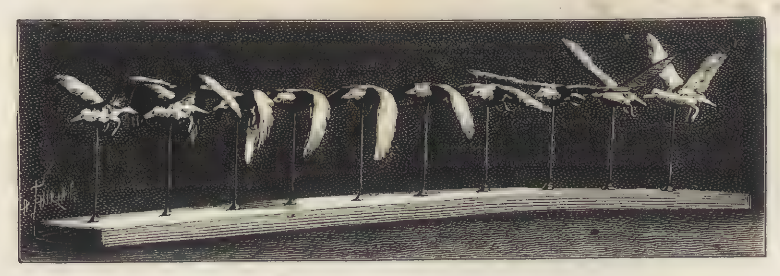


Fig. 103. — Figures en relief représentant les attitudes successives du Goéland pendant un coup d'aile.

représentées dans la figure 103, en tant que position des ailes par rapport au corps ; il n'en est pas de même des positions du corps de l'oiseau dans l'espace. En effet, un Goéland, qui vole avec une vitesse de 8 mètres au moment de l'essor, ne parcourt pas entre deux éclairements, c'est-à-dire en 1/50 de seconde, la longueur de son corps, qui est de 40 centimètres environ ; il en parcourt environ les $\frac{4}{10}$, de sorte que ses images se superposent partiellement sur la glace sensible. Dans une représentation en relief des véritables attitudes de l'oiseau, les images doivent s'entre-péné-

trer, comme cela se voit dans une autre série qui a été également coulée en bronze et dont la figure 104 montre l'aspect général.

Cette dernière représentation de l'oiseau donne une très bonne idée de la nature de ses mouvements. On peut retourner cette pièce solide dans tous les sens, l'examiner sous toutes ses faces, et acquérir, en quelques instants, plus de notions sur la cinématique du vol que n'en donne l'inspection d'images planes. La figure 104 ne donne nécessairement qu'une idée imparfaite du modèle en relief; celui-ci est déposé dans les collections de la Station physiologique.

On voit, dans les premières images en relief, que l'aile qui

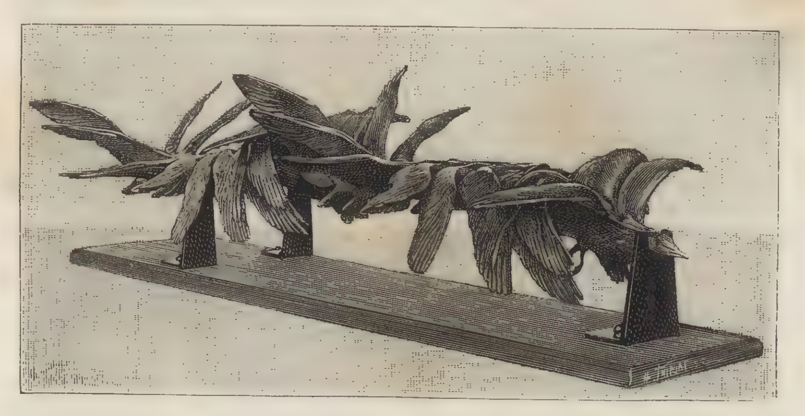


Fig. 104. — Série de figures en relief s'entrepénétrant afin de représenter les positions réelles du Goéland dans l'espace, à des instants très rapprochés d'un coup d'aile.

s'abaisse se porte en avant et qu'elle étreint, pour ainsi dire, l'air sous les flancs et le long du corps de l'oiseau. Pendant toute cette phase d'abaissement, l'aile est déployée, les articulations du coude et du carpe sont ouvertes. A la septième image, la flexion du coude et celle du carpe se produisent soudainement, par des actes solidaires dont le mécanisme a été indiqué § 38; l'aile remonte alors, fléchie, et les rémiges pendent verticalement. Le déploiement de l'aile s'effectue à la dixième image, c'est-à-dire à la fin de la remontée.

Il ne faut pas chercher dans ces figures une fidélité parfaite

au point de vue des détails, mais seulement la vérité des attitudes, la vitesse angulaire de l'aile, ses changements d'inclinaison, ses torsions sous l'influence de la résistance de l'air.

Toutes ces notions auront une importance extrême, quand on devra établir la théorie mécanique du coup d'aile.

§ 109. Images photochronographiques de l'oiseau, recueillies sous des incidences variées. — De même que pour le Goéland,



Fig. 105. — Attitudes successives du Pigeon dans une révolution de l'aile. Figures projetées sur un plan horizontal.



Fig. 106. — Dessin au trait destiné à faire comprendre les contours de la fig. 105.

j'ai pris, sur le Pigeon, des séries d'épreuves recueillies sous des incidences différentes. Les images ainsi obtenues présentaient

parfois des aspects imprévus. Ainsi, les attitudes du Pigeon, projetées sur le plan horizontal (fig. 105 et 106), c'est-à-dire photographiées du haut du pylone § 106 présentent des aspects étranges, que l'on n'eût certainement pas prévus à l'inspection des images prises de côté.

On en jugera par la figure 107 où la même lettre désigne les deux projections, verticale et horizontale, d'une même attitude. Assurément, la figure *a*, vue en projection verticale, montre bien que les ailes du Pigeon sont fortement portées en avant, mais elle ne saurait faire comprendre jus-

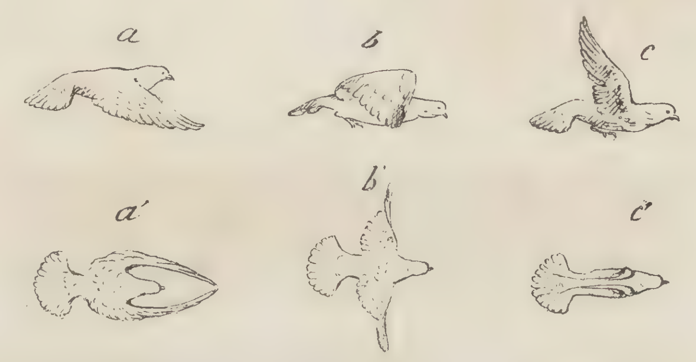


Fig. 107. — Trois attitudes du Pigeon projetées diversement. — *a*, projection verticale à la fin de l'abaissement de l'aile ; *a'*, projection horizontale au même instant. — *b*, projection verticale du début de la remontée de l'aile ; *b'*, même instant en projection horizontale. — *c*, élévation de l'aile projetée verticalement ; *c'*, projetée horizontalement.

qu'à quel point leurs extrémités se rapprochent ; ce détail se voit très bien au contraire sur la figure *a'*, projetée horizontalement.

En *b*, au moment où l'aile se reploie, son extrémité se porte en dehors par une flexion très prononcée de l'articulation carpienne ; cela ne se voit guère sur la projection verticale, mais ce mouvement est très frappant au contraire sur la projection horizontale *b'*.

Enfin la figure *c*, qui montre la relevée des ailes, ne permet pas de juger que leurs faces dorsales arrivent au contact, ce qui se voit bien en *c'*.

§ **110. Images en relief des attitudes d'un Pigeon, pendant**

un battement d'ailes. — Avec les documents fournis par les photochronographies, j'ai fait, pour le Pigeon, comme pour le Goéland, une série de figures en relief. On voit (fig. 108) deux attitudes successives de l'oiseau pendant la durée d'un coup d'aile.

Le Pigeon a le battement bref, environ 1/9 de seconde, aussi a-t-il fallu multiplier le nombre des images, c'est-à-dire rapprocher beaucoup les éclairements successifs, pour saisir la série des phases du mouvement. L'intervalle entre deux attitudes consécutives sur ces figures en relief n'est guère que de 1/100 de seconde.

§ 111. **Adaptation des figures en relief au zootrope.** — Pour tirer de ces figures en relief tout le parti possible, relativement à l'analyse des mouvements du vol, il fallait les examiner avec

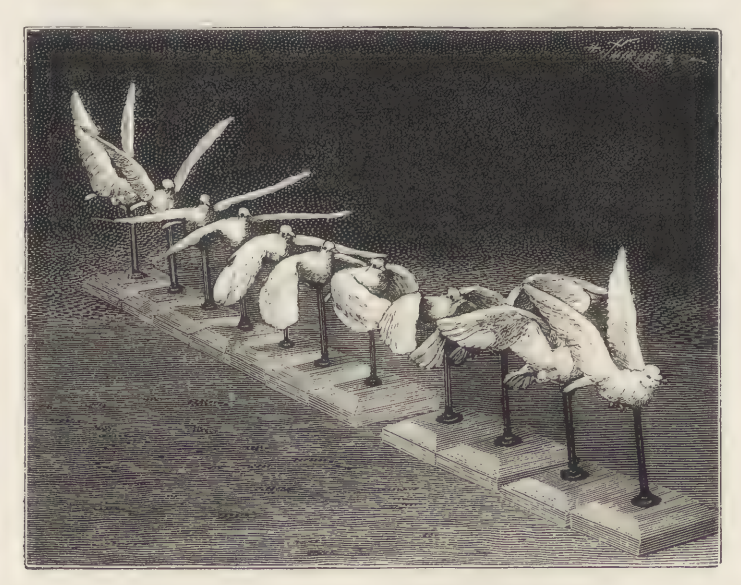


Fig. 108. — Figures en relief du Pigeon disposées en série et montrant la succession des attitudes de l'aile pendant la durée d'un battement.

l'appareil de Plateau, comme on a fait § 104, pour les figures planes représentant les phases successives d'un coup d'aile. Une modification du phénakistiscope connue sous le nom de

zootrope[1] et fort répandue depuis quelques années se prêtait très bien à cet usage.

Dix images en relief du Goéland furent disposées (fig. 109) à

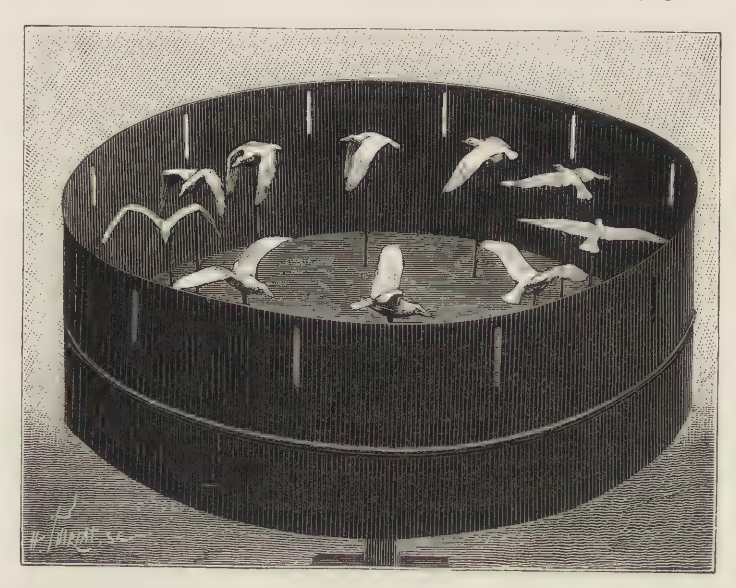


Fig. 109. — Zootrope dans lequel sont disposées dix images en relief d'un Goéland, dans les attitudes successives de son vol.

l'intérieur du zootrope. L'instrument, une fois mis en mouvement, donna l'illusion parfaite d'une suite de Goélands volant, les uns derrière les autres, suivant un cercle fermé.

L'avantage très grand des figures en relief, c'est qu'elles

1. Le zootrope a la forme d'un cylindre large et peu élevé tournant autour de son axe. A l'intérieur, est étalée une bande de papier, sur laquelle sont tracées les figures représentant les phases successives d'un mouvement. Des fentes, dont le nombre diffère plus ou moins de celui des figures § 101, sont percées dans les parois du cylindre. C'est par ces fentes qu'on aperçoit la succession des images et qu'on reçoit l'illusion du mouvement.

Les figures en relief de l'oiseau, portées sur des pieds métalliques implantés dans la base du cylindre, furent disposées en série tout autour de l'axe central. Le cylindre avait environ 70 centimètres de diamètre; il était mis en mouvement à la main. Je me propose d'adopter une disposition mécanique bien plus commode, introduite par M. Ottomar Anschutz.

permettent de voir l'oiseau sous toutes les incidences possibles. En effet, grâce à l'arrangement circulaire des figurines, chacune se présente à l'observateur sous des aspects successifs différents. Quand on suit le sens de sa translation apparente, le Goéland est vu d'abord par l'arrière ; puis il se présente de plus en plus obliquement, passe en plein travers et revient enfin sur l'observateur. De sorte que, suivant la partie du circuit sur laquelle on fixe son attention, on voit l'oiseau qui fuit, qui passe ou qui s'approche : sous ces trois aspects, on peut étudier à loisir les mouvements des ailes, et en ralentir à son gré la vitesse, en ralentissant plus ou moins la rotation du zootrope.

En plaçant successivement, dans l'instrument, les figures du Goéland et celles du Pigeon, j'ai pu comparer entre eux ces deux types de vol, et j'ai noté que, derrière certaines dissemblances apparentes, ils offraient de profondes analogies[1].

§ **112. Les mouvements de l'aile de l'oiseau peuvent être exactement déterminés par les méthodes actuelles de la physiologie expérimentale.** — Cette revue sommaire des ressources dont on dispose pour analyser les mouvements suffira sans doute pour montrer que, dans les actes si complexes et si rapides du vol, il n'y a rien cependant qui défie la puissance des nouvelles méthodes. On peut déjà tout connaître et tout mesurer dans les actes cinématiques du coup d'aile ; or les méthodes qui servent à analyser les mouvements se perfectionneront sans doute beaucoup dans l'avenir, et donneront à la mécanique animale une base expérimentale aussi solide que celle sur laquelle s'appuie la mécanique ordinaire. Celle-ci est fondée tout entière sur la connaissance des masses, des vitesses et des directions du mouvement.

1. Comme les images du Pigeon sont au nombre de 11 et celles du Goéland de 10 seulement, le même nombre de fenêtres ne convient pas pour étudier ces deux séries d'images. Des bandes de zinc circulaires, portant des fenêtres en nombre variable, peuvent se substituer les unes aux autres, de sorte qu'on prend celle à 10 fenêtres pour le Pigeon, celle de 9 pour le Goéland, etc.

Que manquait-il donc autrefois pour que les mouvements des êtres vivants fussent aussi bien connus que ceux des astres, ou ceux des masses inertes qui se meuvent dans nos machines industrielles? Ce qui manquait surtout, c'était la connaissance parfaite des positions que chaque partie du corps présente à des instants bien déterminés, parce que notre œil est incapable de suivre des mouvements trop rapides. La photochronographie a comblé cette lacune.

Les perfectionnements ultérieurs qui devront être apportés à cette méthode sont de l'ordre de ceux que les appareils astronomiques ont reçus et grâce auxquels les mesures de temps et d'espace sont devenues si parfaites. Une petite inégalité dans la division d'un disque fenêtré, un léger défaut dans l'uniformité de la rotation de ce disque, peuvent entraîner une erreur dans l'estimation de la vitesse d'un mouvement par la photochronographie; mais ces imperfections sont bien faibles, et j'ai apporté tous mes soins à les éviter.

Une cause d'erreur plus importante réside dans la difficulté d'apprécier exactement, d'après la position d'images successives sur la plaque photochronographique, les positions que l'objet représenté occupait réellement dans l'espace. C'est sur ce point qu'il reste encore certains progrès à réaliser. Ces progrès consisteront surtout dans la construction d'instruments plus parfaits mais aussi beaucoup plus coûteux[1].

1. Avec les objectifs photographiques du commerce, si l'on veut avoir des images fortement éclairées, ce qui est nécessaire pour les courtes poses de 1/1000 de seconde et au-dessous, il faut recourir aux courts foyers. Dès lors, les images, étant fort petites, doivent être soumises à des agrandissements considérables, mais les agrandissements risquent de déformer les images, et en donnant une grande importance au grain de la gélatine, rendent incertains les contours, ainsi que la position des points de repère. Or, quelques millimètres d'erreur dans la position de ces points altèrent beaucoup l'estimation des vitesses de l'oiseau.

Si, pour avoir des images plus grandes, on rapproche l'appareil photographique de l'objet en mouvement, les indications sont faussées par les déplacements parallactiques. Soit en effet (fig. 110) l'appareil photographique, situé à une courte distance du lieu où passe l'oiseau, celui-ci

§ 113. Résumé des principaux faits que l'expérimentation a dévoilés relativement à la nature des mouvements du vol ramé. — Avec les différentes méthodes ci-dessus exposées, on peut déterminer les actes cinématiques du vol, c'est-à-dire les mouvements des différentes parties de l'oiseau les unes par rapport aux autres et les mouvements de l'oiseau lui-même dans l'espace.

apparaîtra sous des incidences différentes aux divers lieux de son passage : il sera d'abord vu obliquement, de telle sorte que sa tête sera visible et sa queue cachée; plus loin, il sera vu exactement de profil; à la fin, on le verra de nouveau obliquement, mais par l'arrière.

Ces effets, dus à la perspective, diminuent à mesure qu'on place l'appareil

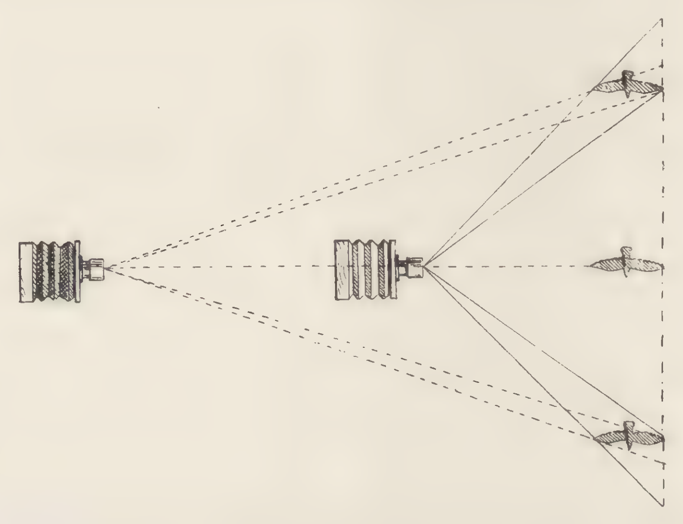


Fig. 110. — Influence des distances de l'appareil et de l'objet en mouvement, sur la position apparente des images.

plus loin de l'objet et que les rayons qui vont de l'un à l'autre tendent de plus en plus à devenir parallèles entre eux. Il faut nécessairement, pour obtenir des images aussi parfaites que possible, employer un objectif à long foyer et à grande ouverture; on pourra ainsi opérer de loin et avoir cependant de grandes images puissamment éclairées.

La photochronographie exigerait donc, comme la photographie stellaire, des appareils spéciaux d'une grande puissance : l'insuffisance de ressources matérielles m'a seule empêché jusqu'ici de les faire construire.

Les figures, planes ou solides, que donne la méthode graphique, contiennent la meilleure définition de ces mouvements ; c'est sur elles seulement que l'on peut s'exercer avec fruit à formuler une théorie mécanique du vol. Toutefois, pour résumer les connaissances acquises par l'expérience, j'essayerai de résumer en quelques propositions les faits principaux que l'expérimentation a révélés.

1° L'abaissement des ailes soulève légèrement le corps de l'oiseau et *accroît sa vitesse* de translation horizontale; tandis que, pendant l'élévation des ailes, l'oiseau est soutenu, parfois même légèrement soulevé, mais avec *diminution de sa vitesse* de translation horizontale.

2° L'aile décrit, par sa pointe, une trajectoire de forme elliptique, dont le grand axe est oblique en bas et en avant.

3° Le sens du mouvement sur cette trajectoire est tel, que l'aile se porte en avant pendant la phase descendante, en arrière pendant la remontée.

4° L'aile qui s'abaisse est étendue, et se rapproche de la forme plane : la résistance de l'air, soulevant l'extrémité des rémiges, en efface à peu près complètement la courbure, qui est naturellement concave en dessous.

5° Dans sa remontée, l'aile incline sa surface par rapport à l'axe du vol, de telle sorte que sa face inférieure regarde un peu en avant.

6° La durée de l'abaissement de l'aile est, en général, un peu plus longue que celle de la remontée.

7° Au moment de l'essor, l'aile n'est rigide que pendant son abaissement ; elle est en partie reployée pendant la remontée. Ces reploiements deviennent de moins en moins prononcés, chez les grands oiseaux, à mesure que le vol s'accélère.

8° A l'essor, la remontée de l'aile s'accompagne de rotation des rémiges sur leur axe longitudinal. Ces rémiges fendent l'air individuellement par leur tranche, laissant entre elles des intervalles par lesquels l'air passe librement.

Tels sont les faits bien établis qui peuvent déjà servir de base à l'interprétation mécanique du coup d'aile.

Ils permettent, en effet, de mesurer les forces qui sont en jeu dans le vol des oiseaux, d'apprécier les résistances que l'air présente à l'aile sous différentes incidences; enfin, de mesurer le travail mécanique dépensé par l'oiseau pour se soutenir et se transporter dans l'air.

TROISIÈME PARTIE

LE PROBLÈME MÉCANIQUE DU VOL RAMÉ

CHAPITRE XII

DES FORCES QUI AGISSENT DANS LE VOL RAMÉ

On peut mesurer les forces qui agissent dans le vol ramé, d'après les déplacements qu'elles impriment à la masse de l'oiseau; analogie de ce problème avec ceux qu'on traite en balistique. — Des mouvements qu'éprouve continuellement le corps d'un oiseau qui vole. — Changements de position du centre de gravité dans le corps, sous l'influence du mouvement des ailes. — Positions successives du centre de gravité de l'oiseau dans l'espace, aux différents instants du vol. — Méthodes pour mesurer les forces qui agissent à chaque instant sur la masse de l'oiseau; cause d'erreur dans ce genre de mesure. — Évaluation des composantes verticale et horizontale, qui soutiennent et propulsent l'oiseau.

§ 114. **On peut mesurer les forces qui agissent dans le vol ramé, d'après les déplacements qu'elles impriment à la masse de l'oiseau ; analogie de ce problème avec ceux qu'on traite en balistique.** — Quand on connaît la masse d'un corps et les mouvements dont il est animé, on peut calculer les forces qui interviennent pour produire ces mouvements. Ainsi, en balistique, si l'on connaît les positions successives d'un projectile sur sa trajectoire, à des instants déterminés, on en peut déduire la force de la poudre qui l'a lancé, la résistance de l'air et la pesanteur qui ont imprimé le mouvement au projectile.

Or nous connaissons, par la photochronographie, la trajectoire de l'oiseau, ses inflexions diverses, ses accélérations et ses ralentissements; en outre, il est facile de mesurer le poids de l'animal et par conséquent sa masse. Nous pouvons donc, sans rien préjuger du mécanisme du vol, mesurer la force qui soutient l'oiseau et celle qui produit sa translation dans l'air.

Pour rendre plus intelligible cette estimation des forces, d'après les mouvements qu'elles impriment à des masses connues, examinons d'abord les conditions plus simples d'un problème de balistique.

Devant l'appareil photochronographique, lançons, au moyen d'une sorte de catapulte, une sphère blanche éclairée par le soleil. On trouvera sur le cliché, non seulement les inflexions de la trajectoire du mobile, mais les positions qu'il occupait à des

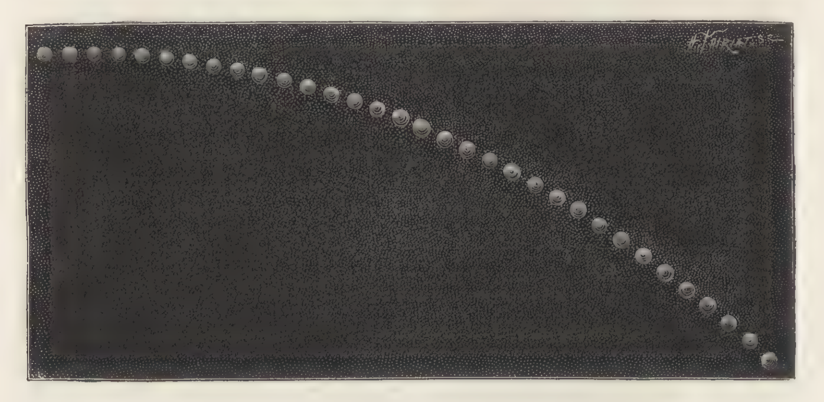


Fig. 111. — Trajectoire photochronographique d'un projectile.

intervalles de temps égaux, à chaque cinquantième de seconde dans le cas présent. La figure 111 montre cette trajectoire et permet d'en caractériser géométriquement la forme qui est très sensiblement parabolique.

Si l'on rapporte à des coordonnées rectangulaires les positions successives du mobile à des intervalles de temps égaux (fig. 112), on pourra suivre séparément l'effet des deux forces qui agissent pour engendrer cette trajectoire.

D'une part, le déplacement horizontal du projectile, mesuré sur l'axe des abscisses, est sensiblement uniforme ; il est donc produit par une force qui avait cessé d'agir dès le début du mouvement observé : cette force était la détente d'un ressort.

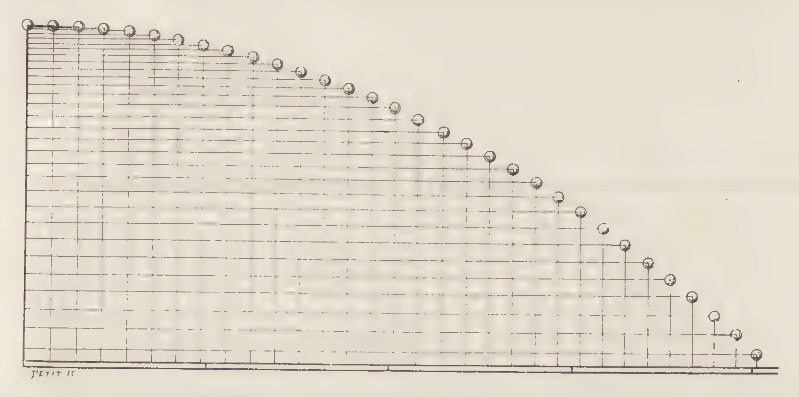


Fig. 112. — Positions successives du projectile rapportées à deux axes perpendiculaires entre eux.

D'autre part, le déplacement vertical, mesuré sur l'axe des ordonnées, est à peu près uniformément accéléré ; il est donc l'effet d'une force constante, la pesanteur[1].

La valeur relative de ces forces peut se déduire du mouvement que chacune d'elles a imprimé à la masse du projectile. Enfin, comme on connaît la valeur absolue de la pesanteur, c'est-à-dire le poids du projectile, on peut comparer à ce poids, c'est-à-dire évaluer en grammes, la force du ressort propulseur, si l'on connaît le temps pendant lequel ce ressort a agi.

§ **115. Des mouvements qu'éprouve continuellement le corps d'un oiseau qui vole.** — La méthode qui vient d'être décrite est applicable à l'analyse des mouvements qu'éprouve le corps d'un oiseau pendant le vol et, par conséquent, à la mesure des forces qui interviennent

1. L'analyse de la figure ci-dessus a montré un phénomène assez curieux : la chute du mobile animé d'une translation horizontale a été notablement plus lente que s'il fût tombé verticalement sans éprouver de translation. L'air présente donc, sous l'influence du déplacement horizontal, une résistance plus grande à la chute du mobile.

Soit (fig. 113) une série d'images photochronographiques d'un Goéland au vol. Sur chacune de ces images, choisissons un point bien défini, qui ne soit caché par les ailes à aucun instant de leur battement : l'œil par exemple. En joignant, par une ligne

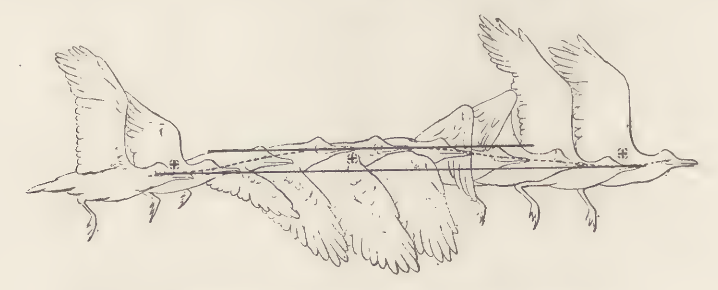


Fig. 113. — Trajectoire onduleuse de l'œil du Goéland pendant le vol.

ponctuée, les positions de l'œil sur la série des images successives, on aura une courbe sinueuse ; l'œil a donc subi, pendant chaque coup d'ailes, des alternatives d'élévation et d'abaissement.

Tous les observateurs ont constaté ces oscillations verticales, surtout aux premiers instants du vol : le corps de l'oiseau s'élève, chaque fois que les ailes s'abaissent ; il descend au contraire à chaque élévation des ailes. J'ai d'ailleurs démontré (§ 81) ces oscillations verticales en les inscrivant. Est-ce à dire que la *masse* de l'oiseau éprouve les mêmes oscillations qu'un point particulier de son corps ? Cette conclusion ne serait pas rigoureuse. En effet, la masse d'un corps doit être considérée comme ayant pour siège son centre de gravité. Dans un projectile de forme invariable, le centre de gravité est immobile, mais il n'en est plus de même pour un corps de forme irrégulière dont les différentes parties se déplacent les unes par rapport aux autres.

Or, quand un oiseau bat des ailes, son centre de gravité se déplace sous l'influence de ces battements. Il monte quand les ailes s'élèvent, descend quand elles s'abaissent. Il pourrait donc se faire que le centre de gravité de l'oiseau se tînt sur

une droite, tandis que chaque point du corps, individuellement considéré, présenterait une trajectoire plus ou moins compliquée.

Pour rendre ce fait plus sensible, recourons encore à la photochronographie. Au lieu d'une sphère unique, lançons devant le champ noir deux sphères, de masses inégales, réunies par un fil (fig. 114) ; ces deux masses, animées, au départ, d'un mouvement de rotation, vont se comporter, l'une

Fig. 114. — Trajectoire de deux masses inégales réunies par un fil.

par rapport à l'autre, à peu près comme un astre avec son satellite. Ni l'une ni l'autre de ces sphères ne suivra la trajectoire parabolique, mais chacune décrira autour de cette trajectoire des oscillations d'autant plus prononcées que sa masse sera plus petite. Et pendant ce temps, le centre de gravité du système se mouvra sur la courbe parabolique, sans s'en écarter jamais.

La masse du corps et la masse des ailes, changeant à chaque instant de position, l'une par rapport à l'autre, s'influencent de la même façon que les boules conjuguées dont on vient de voir les mouvements ; elles se communiquent réciproquement des oscillations auxquelles ne participe pas le centre de gravité, c'est-à-dire la masse de l'oiseau.

§ 116. **De la position du centre de gravité dans le corps suivant les différentes attitudes des ailes.** — Pour faire la part des oscillations apparentes de l'oiseau et de celles de son centre de gravité, il faut déterminer la position de ce dernier point dans le corps de l'animal, pendant les deux phases opposées d'élévation et d'abaissement des ailes. On cherchera ensuite si le point dans lequel la masse de l'oiseau est censée concentrée participe aux déplacements oscillatoires des différents points matériels du corps.

La vieille méthode employée par Borellus[1] pour déterminer la position du centre de gravité dans le corps d'un homme peut donner une grossière approximation des déplacements de ce point dans le corps d'un oiseau, suivant que les ailes sont élevées ou abaissées.

Plaçons un Goéland mort sur une planchette à bascule, après avoir disposé ses ailes dans l'attitude d'élévation; puis, marquons sur son corps la hauteur à laquelle est situé le centre de gravité. Abaissons maintenant les ailes et déplaçons le corps de l'oiseau jusqu'à ce qu'il soit de nouveau en équilibre sur la planchette, la position nouvelle du centre de gravité sera environ 3 centimètres et demi plus bas que tout à l'heure. Ce déplacement de 35 millimètres, que le centre de gravité a subi en raison des changements d'attitude des ailes, devra se retrancher de l'amplitude des oscillations apparentes de l'oiseau; le reste constituera l'oscillation verticale réelle de sa masse.

Mais on a vu § 75 que l'aile éprouve aussi des mouvements dans le sens horizontal : qu'elle se porte en avant pendant qu'elle s'abaisse, en arrière pendant sa remontée. Le centre de gravité de l'oiseau éprouvera donc, à l'intérieur du corps, non seulement des déplacements verticaux, mais aussi des mouvements alternatifs de sens horizontal. En déterminant sur la planchette à bascule les mouvements horizontaux du centre de gravité, on trouve, pour les attitudes extrêmes de l'aile, que l'étendue de ces mouvements est à peu près de $0^{m},015$.

Ainsi, en estimant, sur la série des images photochronographiques, les positions réelles du centre de gravité, il faudra tenir compte des déplacements produits par le mouvement des ailes, aussi bien dans le sens vertical que dans le sens horizontal.

§ 117. **Des déplacements que le centre de gravité de l'oiseau éprouve dans l'espace, aux différents instants du vol.** — D'après les petites images données par la photochronographie, dans les

1. Borellus, *de Motu animalium*, t. I, Propos. CXXXIV.

conditions encore imparfaites où j'étais placé, on ne peut estimer que d'une manière assez grossière les déplacements du centre de gravité dans l'espace. Voici toutefois le moyen auquel j'ai recouru.

En ce qui concerne les déplacements verticaux du centre de gravité, sous l'influence des élévations et des abaissements de l'aile, l'expérience faite avec la planchette à bascule permet de marquer sur les images de l'oiseau la position de ce point. C'est ce qu'on a fait pour les deux attitudes maxima d'élévation et d'abaissement de l'aile. Une croix contenue dans un cercle indique (fig. 113) les hauteurs du centre de gravité de l'oiseau dans ces deux instants. On voit par là que le centre de gravité ne participe pas aux oscillations si prononcées de l'œil; ces dernières, limitées par les deux lignes horizontales sur la figure à dimensions réduites, avaient en réalité 4 centimètres et demi d'amplitude, tandis que les déplacements verticaux du centre de gravité étaient à peine sensibles : leur valeur était d'un centimètre à peine ; j'ai donc cru pouvoir les négliger, car la méthode de la planchette pouvait bien, à elle seule, donner de pareils écarts.

Quant aux positions successives du centre de gravité dans l'espace, mesurées dans le sens horizontal, elles diffèrent également de celles de l'œil, car on a vu que, sous l'influence des mouvements de l'aile en avant et en arrière, le centre de gravité se déplace horizontalement dans le corps. Il faut évaluer ces déplacements intérieurs, afin de déterminer les positions successives du centre de gravité dans l'espace.

A défaut de raisons plausibles pour agir autrement, je crus pouvoir assigner aux déplacements horizontaux du centre de gravité dans le corps, des valeurs égales pour des intervalles de temps égaux. Ces corrections étant faites, et la position probable du centre de gravité dans l'espace étant déterminée pour la série d'instants correspondant aux images successives, c'est-à-dire à des intervalles de temps d'un cinquantième de seconde, il suffisait d'opérer comme dans le problème de balistique exposé ci-dessus, afin d'obtenir la valeur des forces qui ont agi à chaque instant pour soutenir et pour propulser l'oiseau.

En effet, comme les forces sont proportionnelles aux accélérations qu'elles impriment à une même masse, en déterminant les accélérations verticales et horizontales du centre de gravité de l'oiseau entre deux instants consécutifs, on aura la valeur des forces qui ont produit ces accélérations.

§ 118. Méthode pour mesurer les forces qui agissent, à chaque instant, sur la masse de l'oiseau. — Sur la figure où les positions successives du centre de gravité dans l'espace ont été pointées avec les corrections indiquées, on trace deux coordonnées rectangulaires, l'une horizontale et l'autre verticale, auxquelles on rapporte chacune des positions du centre de gravité. Ces déplacements, qui se sont produits en un cinquantième de seconde, étant multipliés par 50, donnent la *vitesse* de l'oiseau, soit dans le sens vertical, soit dans le sens horizontal, à chacun des intervalles de temps considérés.

La différence de ces vitesses entre deux instants consécutifs est l'*accélération*, positive ou négative, que la masse de l'oiseau a éprouvée dans le sens vertical ou dans le sens horizontal. En comparant cette accélération à celle que produit la pesanteur, on obtient la valeur de la force qui a agi sur la masse de l'oiseau.

Si, par exemple, on trouvait qu'à l'un des instants considérés, l'accélération de la masse de l'oiseau a été de $4^{m},90$ à la seconde, comme la pesanteur produit, dans le même temps, une accélération de $9^{m},80$, c'est-à-dire deux fois plus grande, on en devrait conclure que la force qui a agi sur l'oiseau était deux fois plus faible que la pesanteur. De sorte que, pour notre Goéland qui pesait $0^{k},623$, la force accélératrice était de $\frac{P}{2}$ ou $0^{k},3115$.

Dans l'application de cette méthode, on rencontre certaines difficultés qui sont de nature à altérer la précision des résultats, ainsi qu'on va le voir.

§ 119. Causes d'erreur dans la mesure des forces d'après les données de la photochronographie. — La partie mécanique de l'appareil photochronographique fonctionne avec une précision très suffisante, c'est-à-dire que les éclairements se font à des in-

tervalles de temps strictement égaux[1]; mais les appareils optiques dont je dispose sont incapables de donner de grandes images d'un oiseau qui vole à une certaine distance (§ 113). Sur les épreuves avec lesquelles j'ai tenté de mesurer les forces d'après les accélérations, l'image est environ 61 fois plus petite que l'objet photographié. Il s'ensuit que, dans la détermination du centre de gravité sur chaque image, les erreurs se multiplieront soixante et une fois. Pour diminuer cet inconvénient, il eût fallu étudier les images au moyen de micromètres.

J'ai cherché à agrandir les photographies, en les projetant sur un écran; mais les images ainsi agrandies étant moins nettes, les déterminations restent incertaines. En outre, on produira des images déformées, si les appareils optiques employés pour l'agrandissement présentent quelque défaut (2). Enfin, les calculs eux-mêmes ne peuvent être faits que par un mathématicien exercé, car ils donnent lieu à des considérations fort délicates.

J'essayai toutefois, avec les ressources dont je disposais, de déterminer les forces qui agissent aux différents instants du coup d'aile.

1. Si l'appareil était orienté de telle sorte que la fenêtre éclairante passât transversalement, soit dans le sens du mouvement de l'oiseau, soit dans le sens contraire, l'intervalle de temps qui séparerait la formation de deux images successives ne correspondrait plus à un tour de disque, mais à la durée d'un tour augmentée ou diminuée du temps employé par l'image à se déplacer sur la plaque sensible. Du reste, cette quantité, à peu près négligeable, n'affecterait que la valeur absolue des vitesses et des accélérations mesurées. Il est toutefois avantageux de faire disparaître cette cause d'erreur en orientant l'appareil de telle sorte, que la fenêtre du disque passe verticalement, c'est-à-dire perpendiculairement au déplacement de l'oiseau.

2. Pour donner une idée de l'importance des erreurs que l'on peut commettre dans l'appréciation de la place du centre de gravité sur les petites images, supposons que l'on se trompe de $\frac{1^{mm}}{3}$: ce tiers de millimètre d'erreur sur l'espace parcouru en 1/50 de seconde par un oiseau 61 fois plus grand que son image représentera, dans l'appréciation de la vitesse, par seconde, une erreur de $\frac{1^{mm} \times 50 \times 61}{3}$, soit $1^{m},017$.

§ 120. Évaluation des composantes verticale et horizontale qui agissent sur l'oiseau dans le vol. — Si l'on considère comme nuls les déplacements du centre de gravité de l'oiseau, c'est-à-dire les accélérations suivant la verticale (§ 115), on est conduit à admettre que la pesanteur est constamment neutralisée par une force égale et contraire, c'est-à-dire par une composante verticale ou *poussée de bas en haut*, continuellement égale à son poids, soit $0^k,623$ grammes pour notre Goéland.

Pour obtenir les valeurs de la composante horizontale qui propulse l'oiseau, il faut construire la courbe de ses *accélérations*, ce qu'on obtient par la série des opérations suivantes :

On a d'abord construit (fig. 115) la courbe des vitesses *abc* (ligne ponctuée) en élevant, à des intervalles de temps égaux 1,2,3..., comptés sur les abscisses, des ordonnées égales aux espaces réellement parcourus par l'oiseau dans les cinquantièmes de seconde successifs. Puis, on a corrigé cette courbe d'après les déplacements horizontaux du centre de gravité, ce qui a donné la courbe pleine *ab'c*.

De cette courbe des vitesses on a tiré celle des accélérations *o*, *a*, *a'* X (au bas de la figure), et pour comparer cette accélération à celle que produirait la pesanteur, on a mené la droite *pp* parallèle à l'axe des abscisses, dont elle est éloignée d'une distance égale à celle dont la pesanteur accroît la vitesse des corps graves en 1/50 de seconde.

L'examen de la courbe des accélérations montre que la force qui l'a produite était tantôt positive, c'est-à-dire s'exerçant suivant la direction du vol dont elle accroissait la vitesse, et tantôt négative, c'est-à-dire agissant pour ralentir la translation de l'oiseau. Enfin, cette force passait par des maxima et des minima dont les valeurs absolues étaient $+ 1^k,090$ et $- 1^k,801$.

L'article où j'exposais ces premiers résultats[1] tomba sous les yeux d'un mathématicien fort exercé à ce genre de calculs, le capitaine de Labouret, qui a souvent à traiter par la même mé-

1. *Revue scientifique*, 8 septembre 1888.

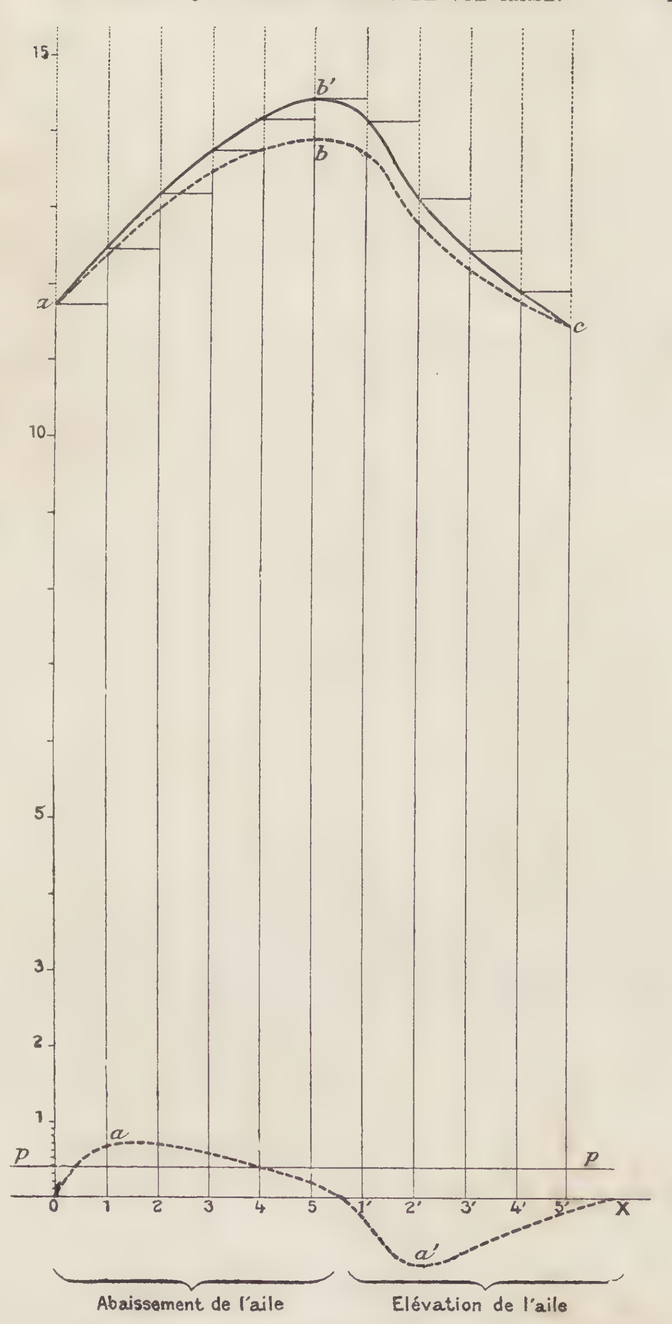


Fig. 115. — Courbes des vitesses et des accélérations de l'oiseau, pendant la durée d'un coup d'aile. Les ordonnées sont en grandeur réelle.

thode des problèmes de balistique. De Labouret reprit le problème dès son origine et, d'après mes images photochronographiques, refit les mensurations et les calculs, en y introduisant d'importantes corrections.

Et d'abord, au lieu des approximations grossières dont j'avais dû me contenter, de nouvelles mesures furent prises au micromètre, pour déterminer plus exactement les positions successives de l'œil de l'oiseau. Cela eut pour premier résultat de faire

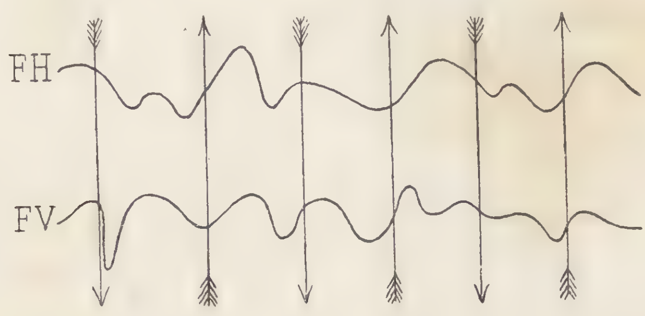


Fig. 116. — Courbes des variations de la force horizontale FH et de la force verticale FV d'après de Labouret. Des flèches indiquent par leur direction les instants où les ailes s'élèvent et ceux où elles s'abaissent.

apparaître des oscillations verticales du centre de gravité. D'autre part, au lieu d'admettre que les déplacements, en avant ou en arrière, du centre de gravité dans le corps soient sensiblement égaux pour chacun des intervalles de 1/50 de seconde, qui séparent la formation des images, on peut, avec de Labouret, assimiler le mouvement du centre de gravité de l'oiseau à un mouvement vibratoire s'effectuant autour de sa position moyenne, et alors représenter par des fonctions trigonométriques les déplacements, soit horizontaux soit verticaux, du centre de gravité. La vitesse de ce point varie, d'une manière continue, entre les positions extrêmes, où elle devient nulle ; elle passe, sans discontinuité, des valeurs positives aux valeurs négatives et réciproquement [1].

1. Voir, pour la marche suivie dans ces calculs, le Mémoire publié par de Labouret à la fin de ce volume.

Par suite de ces divers perfectionnements, les valeurs nouvelles obtenues diffèrent sensiblement de celles que j'avais trouvées. La force horizontale qui agit sur l'oiseau oscillerait entre + 3 kil. 500 dans l'abaissement des ailes et — 2 kilogrammes dans leur élévation [1]. Quant à la force verticale qui agit sur l'oiseau, elle aurait des valeurs à peu près aussi grandes. Les phases de la variation de ces forces pendant la durée d'un coup d'aile sont fort curieuses ; elles sont représentées par la figure 116.

§ 121. **Concordance des variations de la force de l'oiseau, calculée d'après les mouvements du centre de gravité, avec celles qu'avait fournies l'inscription mécanique de la force des muscles et des mouvements du corps.** — Les différences numériques entre le résultat de mes expériences et celui du capitaine de Labouret s'expliquent par la précision beaucoup plus grande que ce dernier a introduite dans l'étude des images, en se servant du micromètre. Elles montrent, une fois de plus, qu'il est nécessaire d'accroître cette précision en recourant à des objectifs qui donnent directement de grandes images et réduisent ainsi l'incertitude dans l'estimation des vitesses.

Telles qu'elles sont déjà, ces courbes présentent une frappante analogie avec celles qu'une méthode toute différente m'avait fournies. Si l'on se reporte à la figure 64, p. 122, on y voit deux courbes superposées : La supérieure correspond aux différentes phases de la force du muscle grand pectoral pendant la durée d'un coup d'aile. Cette courbe montre que l'effort du muscle est redoublé : qu'après un effort énergique, il s'en produit un autre plus faible, et que ce dernier coïncide avec le début de la remontée de l'aile. La courbe inférieure est tracée par les accélérations verticales du corps de l'oiseau ; elle est double également, et montre que l'oiseau se soulève une première fois pendant l'abaissement, une seconde fois au début de la remontée de ses ailes.

1. La valeur négative de la force horizontale exprime une cause de ralentissement; dans le cas présent, il s'agit de la résistance de l'air qui agit seule au moment de la remontée des ailes.

Or, ces inflexions sont précisément les mêmes que celles qui ont été obtenues par de Labouret. Cette identité de phases dans les courbes obtenues par des méthodes si différentes doit inspirer confiance dans l'exactitude des résultats des deux sortes d'expériences, au moins en ce qui concerne les valeurs relatives des forces mesurées.

Quant aux valeurs absolues des forces dépensées, elles peuvent sembler exagérées, mais on verra plus loin que l'essor exige toujours une dépense de force beaucoup plus grande que le plein vol; or. c'est à l'essor qu'ont été faites les expériences dont on vient d'analyser les résultats.

On sait, § 19, que la plupart des oiseaux, au moment où ils vont s'envoler, cherchent à se donner de la vitesse, soit en courant, soit en sautant ou se laissant tomber d'un lieu élevé; cela tient à ce que cette vitesse préalable diminue singulièrement le travail qu'ils devront faire, en battant l'air de leurs ailes.

L'abaissement de l'aile et sa remontée sont favorisés par la vitesse de translation de l'oiseau, ainsi qu'on le verra dans les chapitres suivants[1].

1. Mais, dira-t-on, pourquoi n'avoir pas fait les expériences photochronographiques sur des oiseaux en plein vol? on y eût facilement constaté la diminution de la force horizontale qui propulse l'oiseau.

Pour saisir les mouvements du plein vol, il faut des conditions que je n'ai pas encore pu réaliser. En effet, les oiseaux qui servent à mes expériences ne sont pas apprivoisés, et fuient un peu au hasard, au moment où ils se sentent libres; aussi faut-il ne les lâcher que très près du champ obscur, pour avoir quelque chance d'obtenir des images. Je n'ai donc pu encore étudier que les premiers instants du vol, ceux où l'oiseau gagne de la vitesse à chacun de ses coups d'ailes. A ce moment, la résistance de l'air est encore insuffisante pour limiter l'accélération générale du vol. De la sorte chaque abaissement de l'aile crée une grande accélération de l'oiseau; chaque remontée un ralentissement qui ne détruit pas tout l'effet de l'accélération préalable.

Pour obtenir la photographie du plein vol, je me propose d'obliger par quelque artifice les oiseaux, lâchés de fort loin, à regagner leur nid en passant devant les appareils photo-chronographiques.

Ces premières notions sur les forces qui agissent dans le vol n'en éclairent pas le mécanisme. Pour comprendre les actes du vol ramé, il faut saisir la façon dont la force musculaire imprime à l'air une direction de certain sens, tandis qu'une réaction de sens contraire se produit sur le corps de l'oiseau.

Nous sommes donc conduit à rappeler sommairement les lois de la résistance de l'air, pour montrer comment le corps de l'oiseau s'y meut avec une facilité extrême, tandis que les ailes y trouvent un solide point d'appui.

CHAPITRE XIII

DE LA RÉSISTANCE DE L'AIR AUX CORPS QUI S'Y MEUVENT, ET DE SES VARIATIONS SUIVANT LA VITESSE DU MOUVEMENT

Dans la locomotion aérienne, la résistance de l'air représente le point d'appui. — La résistance de l'air a été entrevue par les anciens. — Observations de Galilée; expériences des physiciens. — Influence de la vitesse sur la résistance de l'air. — Mesure de la résistance de l'air à différentes vitesses, d'après la force qui communique ces vitesses à un corps en mouvement dans l'air. — Calcul de la résistance de l'air basé sur la détermination de la masse d'air mise en mouvement et de la vitesse qui lui est communiquée. — Mesure de la résistance de l'air d'après les pressions que le corps en mouvement éprouve sur les différents points de sa surface. — Exploration manométrique des pressions sur les différents points de la surface d'un disque tournant. — Mesure du coefficient de la résistance éprouvée; il est indifférent que le corps solide soit en mouvement dans un air calme, ou qu'il soit immobile dans un air en mouvement.

§ 122. **Dans la locomotion aérienne, la résistance de l'air représente le point d'appui.** — Si l'on cherche à comprendre le mécanisme du vol, la première nécessité qui s'impose est de connaître la *résistance de l'air*. Dans tout genre de locomotion, l'effort des muscles se partage entre deux résistances : d'un côté celle de la masse de l'animal qu'il s'agit de déplacer, de l'autre celle de masses extérieures solides, liquides ou gazeuses, que l'action des muscles tend à repousser en sens inverse de la progression de l'animal. Ce partage de la force musculaire entre deux masses auxquelles elle tend à imprimer des vitesses de sens contraire est le trait commun qui rapproche tous les

genres de locomotion. La masse extérieure que les muscles tendent à repousser se nomme *point d'appui*. Mais quelles différences pour la fermeté de l'appui, suivant qu'il s'exerce sur un sol rigide, un sable mouvant, un liquide ou sur l'air plus mobile encore !

La résistance que l'air oppose aux corps de diverses formes qui s'y meuvent avec des vitesses différentes est encore insuffisamment connue ; toutefois elle présente d'assez grandes analogies avec la résistance de l'eau. Les ingénieurs de la marine ont étudié avec soin cette dernière résistance ; leurs travaux éclairent beaucoup le mécanisme de la locomotion aérienne. J'essayerai, dans une revue très sommaire, d'exposer les progrès successsifs de nos connaissances sur cette importante question.

§ 123. **La résistance de l'air a été entrevue par les anciens.** — La résistance de l'air avait été pressentie par les plus anciens observateurs ; Aristote semble en comprendre les effets quand il compare la queue de l'oiseau à une sorte de gouvernail.

P. Belon, au XVIe siècle, exprime clairement déjà que l'aile de l'oiseau trouve un appui sur l'air comme les pieds d'un marcheur en trouvent sur le sol. « Les plumes qui empougnêt grande « quantité d'œr par la forme des aelles font, en leur endroit, « comme les pieds, ça-bas, marchants dessus terre. »

Fabrice d'Acquapendente, voyant la lenteur avec laquelle un oiseau descend du haut des airs les ailes étendues, le compare à un voile étalé qui tombe lentement.

A partir de Galilée (1655) la résistance de l'air est franchement indiquée dans les théories du vol. (Gassendi 1658) est tout à fait explicite : l'aile frappe l'air, dit-il, et s'y appuie, de sorte que l'oiseau, beaucoup plus pesant que l'air, se soutient comme une pierre qui glisse sur l'eau tant qu'elle la frappe en ricochant.

Mais si les effets mécaniques de la résistance de l'air ont été plus ou moins clairement entrevus par les auteurs qui viennent d'être cités, la théorie du vol était toujours mêlée à la conception d'une force *particulière* qui allégerait l'oiseau et qui

résiderait dans ses plumes. Ne voyait-on pas le duvet s'enlever, pour ainsi dire spontanément, dans l'air?

Depuis Borellus, les théories du vol doivent presque toujours leurs progrès aux expériences des physiciens sur la résistance de l'air. On donne aujourd'hui l'explication scientifique de la plupart des curieux phénomènes que l'observation du vol a révélés. Aussi est-il indispensable, pour l'intelligence de ce qui va suivre, d'exposer succinctement la marche observée par les physiciens dans leurs travaux, sauf à développer, en temps et lieu, ce qui s'applique particulièrement à certains actes du vol.

§ 124. **Observations de Galilée ; expériences des physiciens.** — En étudiant les lois de la chute des graves, Galilée reconnut que si l'on fait tomber, d'une grande hauteur, des corps de même volume, mais de densités différentes, les plus denses arrivent les premiers au bas de leur course. Il comprit que la résistance de l'air était la cause de ce retard. Les physiciens devaient plus tard faire d'innombrables expériences pour trouver la valeur précise de la résistance de l'air aux corps de diverses formes animés de différentes vitesses.

Pour scinder le sujet, cherchons d'abord, dans ce chapitre, l'influence de la *vitesse* sur la résistance de l'air; le chapitre suivant aura pour objet l'influence de la forme des corps en mouvement.

§ 125. **Influence de la vitesse des corps sur la résistance qu'ils éprouvent dans l'air.** — Pour déterminer l'influence de la vitesse sur la résistance de l'air, les physiciens ont recouru à différentes méthodes, dont chacune présente des avantages et des inconvénients, ce qui nous force à les examiner toutes, pour nous faire une idée aussi exacte que possible de la valeur des mesures obtenues.

Dans une *première* méthode, on mesure la résistance de l'air, pour chaque degré de vitesse, d'après la force nécessaire pour imprimer continuellement cette vitesse au corps en mouvement. C'est la méthode imaginée par Newton et suivie plus tard avec

quelques variantes par Borda[1], Hutton[2], Thibault[3] et d'autres encore.

Une *deuxième* méthode rattache la résistance de l'air aux effets de l'inertie de ce fluide. Pour calculer cette résistance, on détermine géométriquement le volume d'air mis en mouvement; on mesure la densité de cet air et la vitesse qui lui est communiquée. Le problème est alors de l'ordre de ceux que traite la mécanique générale.

Les auteurs anglais, tels que Cayley[4] et Wenham[5], ont recouru le plus souvent à cette méthode pour évaluer la résistance de l'air. Poncelet[6] a donné les formules relatives à ce genre de calcul.

Enfin, une *troisième* méthode consiste à considérer la résistance de l'air comme la résultante de la somme des pressions positives et négatives que l'air exerce sur les différents points des corps en mouvement, et à mesurer expérimentalement ces pressions. C'est ainsi que Dubuat[7] a cherché à mesurer la résistance au mouvement dans l'eau. A. Dupré a fait des expériences de ce genre sur la résistance de l'air, et j'ai cherché moi-même, au moyen de manomètres inscripteurs, à donner, d'après les pressions éprouvées en divers points de la surface de corps en mouvement, la valeur de la résistance de l'air à différentes vitesses.

§ 126. **Mesure de la résistance de l'air, à différentes vitesses, d'après la force qui communiquerait ces vitesses à un corps en mouvement dans l'air.** — Lorsqu'un corps soumis à une force constante, comme la pesanteur, entre en mouvement, sa vitesse s'accélère d'abord jusqu'à un moment où elle devient uniforme.

1. Borda, *Mémoires de l'Académie des sciences*, 1763.
2. Hutton, *Nouvelles expériences d'artillerie*, trad. O. Terquen.
3. Thibault, *Recherches exp. sur la résistance de l'air*, Brest.
4. Cayley, *Nicholson's Journal*, 1809, vol. 24, p. 164.
5. Wenham, *Rapport annuel de la Soc. Aéronautique de la Grande-Bretagne*, 1866, trad. dans l'*Aéronaute*, 1876.
6. Poncelet, *Introduction à la mécanique industrielle*, p. 633.
7. Dubuat, *Principes d'hydraulique*, 3e partie.

Quand cette uniformité est établie, c'est que la résistance est constamment égale à la force motrice. Tel est le principe de la méthode de Newton.

Dans les expériences qu'il fit avec Désaguiliers, dans la cathédrale de Saint-Paul, Newton se servit de globes de verre, de 5 pouces de diamètre, qu'on laissait tomber verticalement et dont la vitesse finale était de 4 mètres environ par seconde.

Une série de globes, de dimensions égales, furent chargés de poids graduellement croissants suivant les rapports 1, 4, 9, 16, etc. Ces globes, en tombant sous ces charges croissantes, prenaient un mouvement accéléré d'abord, mais que la résistance de l'air rendait uniforme au bout d'un certain temps. Dans leur phase d'uniformité, les vitesses de chutes étaient plus grandes pour les sphères les plus lourdes; elles croissaient sensiblement dans le rapport des nombres 1, 2, 3, 4. Les poids de ces sphères, c'est-à-dire les forces motrices qui les faisaient tomber, variaient donc proportionnellement aux carrés des vitesses obtenues, et comme les résistances étaient égales à ces poids, elles étaient aussi proportionnelles au carré des vitesses.

A l'époque de Newton, les moyens d'estimer la vitesse des corps en mouvement étaient assez imparfaits; cette méthode ne pouvait donc donner que des résultats approximatifs[1].

Pour obtenir des mesures plus précises, Robins, Hutton, Borda, Thibault, mesurèrent la résistance qu'éprouvent dans l'air des corps animés d'un mouvement rotatif. Ils faisaient tourner, sous l'action de poids connus, des moulinets munis de palettes plus

1. Si, par exemple, pour estimer la vitesse de chute des corps on se servait de la photochronographie, on devrait opérer devant un champ noir portant des divisions métriques et des subdivisions. Devant ce champ, on ferait tomber une des sphères de Newton, lestée d'un poids tel que l'ensemble du système pesât 100 grammes et on prendrait une première série d'images de la chute de cette sphère. La sphère serait ensuite lestée pour porter son poids à 400 grammes, et on opérerait comme ci-dessus. On donnerait enfin à la sphère des poids de 900 gr., de 1,600 gr., etc. Dans les images obtenues, on comparerait les vitesses au moment où le mouvement aurait atteint l'uniformité, et l'on devrait trouver entre ces vitesses les relations 1, 2, 3, 4.

ou moins larges. Comme l'expérience durait assez longtemps, il était facile, en comptant le nombre de tours du moulinet, d'avoir exactement la vitesse du mobile; on mesurait non moins exactement la hauteur de chute du poids moteur, puis, d'après l'égalité du travail moteur et du travail résistant, on obtenait la mesure de la résistance de l'air. On devait, bien entendu, déduire du poids moteur la partie destinée à surmonter les résistances passives [1].

Ces expériences ont confirmé celles de Newton, en montrant que la résistance de l'air croît sensiblement comme le carré de la vitesse; mais elles ont donné des résultats assez incohérents à d'autres égards : ainsi, pour une même vitesse, la résistance croîtrait plus vite que la surface du corps en mouvement [2]. Ces incertitudes dans les résultats ont empêché d'établir un *coefficient* de la résistance de l'air, c'est-à-dire d'estimer en poids cette résistance contre une surface de 1 m. c. se mouvant avec une vitesse de 1 mètre à la seconde.

Toutefois, Thibault pense que la valeur de ce coefficient est voisine de 0k,116. La valeur du coefficient K de la résistance de l'air doit être multipliée par la surface du corps en mouvement et par le carré de la vitesse; de sorte qu'on a pour une surface S, animée de la vitesse V, une résistance $R = KSV^2$.

§ 127. **Applications.** — Ce premier fait, sur lequel tous les

1. A cet effet, on mettait le moulinet en marche sans palette et l'on cherchait le poids nécessaire pour lui imprimer une vitesse égale à celle qu'il avait, sous l'action d'un poids plus fort, quand la palette rencontrait la résistance de l'air.

2. Ces irrégularités tiennent à l'emploi du mouvement rotatif dans lequel la résultante des pressions de l'air sur le corps en mouvement ne correspond pas au centre de figure de ce corps. Une autre cause d'irrégularité tient à ce que, sur les bords de la palette en mouvement, l'air s'échappe et passe de l'avant à l'arrière. Cet effet est relativement plus grand dans les petites surfaces que dans les grandes, et constitue pour les petites un déchet de résistance.

Pour éviter ces inconvénients, Piobert, Morin et Didion ont fait des expériences avec le mouvement rectiligne. Leurs expériences confirment ce fait, que la résistance de l'air est proportionnelle au carré de la vitesse.

expérimentateurs sont d'accord, à savoir que la résistance de l'air croît sensiblement comme le carré de la vitesse, nous montre déjà que plus le coup d'aile sera rapide, plus il trouvera d'appui sur l'air; de plus, cette résistance croissant comme le carré de la vitesse, il s'ensuit qu'à égale amplitude, un coup d'aile *deux* fois plus rapide qu'un autre rencontre dans l'air une résistance *quatre* fois plus grande. Cela explique comment des oiseaux inégalement pourvus de surfaces d'ailes (§ 58) peuvent racheter cette inégalité par une différence dans la vitesse du battement.

On voit aussi que la vitesse de l'oiseau doit nécessairement trouver une limite dans la résistance de l'air, qui croît plus vite qu'elle. L'oiseau, pas plus que les moteurs industriels, ne peut produire du travail mécanique en quantité illimitée. Le travail moteur qu'il peut fournir en un temps donné sera neutralisé, à une certaine vitesse, par le travail résistant produit par l'air. A ce moment, la vitesse de l'oiseau aura atteint la limite qu'elle ne peut dépasser.

Enfin, il faut noter que la résistance de l'air doit être assimilée à un travail, car elle est à chaque instant représentée par un effort, la pression exercée par l'air, effort qui se multiplie par un chemin parcouru.

§ 128. **Calcul de la résistance de l'air, basé sur la détermination de la masse d'air mise en mouvement et de la vitesse qui lui est communiquée.** — C'est de cette façon que Wenham chercha à calculer la résistance au coup d'aile de l'oiseau, d'après le poids d'air mis en mouvement et la vitesse imprimée à ce poids. On comprend que l'exactitude de cette évaluation dépend tout entière de la rigueur apportée dans la mesure des vitesses et des volumes d'air. Voici comment Poncelet traite le problème de la résistance de l'air aux mouvements d'un corps de forme quelconque[1].

« Tout corps qui se meut dans un fluide peut être considéré comme déplaçant un nombre de molécules proportionnel à

1. Poncelet, *Introduction à la mécanique industrielle*, p. 584.

l'aire d'une section de ce corps perpendiculaire à la direction de la marche, et comme imprimant sa propre vitesse à une pareille série de molécules, à chaque instant de son parcours. Il s'ensuit qu'après un trajet d'un mètre, un volume de gaz égal au volume du cylindre engendré par la surface de section multipliée par un parcours d'un mètre aura reçu un mouvement d'une certaine vitesse. La résistance éprouvée sera proportionnelle au carré de la vitesse et à la densité du fluide[1]. »

§ 129. **Applications.** — Le calcul de la résistance de l'air, d'après le principe des forces vives, montre l'importance d'un facteur dont il n'avait pas été tenu compte dans les expériences précitées, je veux parler de la densité de l'air[2]. La résistance de ce fluide est nécessairement proportionnelle à sa densité, et l'on

1. D'après les relations qui existent entre la *hauteur due* et la vitesse, on pourra encore estimer la résistance comme il suit : « La résistance d'un fluide est proportionnelle au poids d'un prisme de ce fluide qui aurait pour base la section et pour hauteur la hauteur due à la vitesse. »

2. En représentant par Q le volume prismatique engendré par le déplacement d'un corps dans l'air, par V sa vitesse, par p la densité de l'air, c'est-à-dire le poids d'un mètre cube de ce fluide, Poncelet donne pour expression de la force vive communiquée à l'air

$$\frac{pQ \times V^2}{g} \quad \text{ou} \quad \frac{pAe \times V^2}{g}$$

en appelant A l'aire correspondante à la projection du corps perpendiculairement au sens de son mouvement, et e l'espace parcouru (l'expression Ae est équivalente à Q, ou volume du prisme engendré par le mouvement).

Si cette force vive a été communiquée à l'air par le corps en mouvement, il faut bien que celui-ci ait éprouvé une résistance qui aura détruit une quantité de travail égale à la moitié de la force vive. Cette résistance est proportionnelle à pAV^2.

Le calcul de la résistance de l'air, d'après la masse déplacée et la vitesse imprimée à cette masse, comporte du reste bien des causes d'erreur; la principale réside dans l'estimation du prisme d'air en mouvement, en prenant pour base de ce prisme la projection du mobile sur un plan perpendiculaire au sens de son déplacement. Cela reviendrait à dire que tout corps ayant une surface de projection donnée trouvera, quelle que soit sa forme, la même résistance dans l'air, pour une certaine vitesse. On verra, au contraire, que la forme du mobile influe au plus haut degré sur la résistance de l'air.

comprend dès lors pourquoi les oiseaux qu'on laisse tomber d'un ballon, à de grandes altitudes, ne trouvent pas dans l'air un point d'appui suffisant pour le vol ramé (§ 28).

§ 130. **Mesure de la résistance de l'air, d'après les pressions que le corps en mouvement éprouve sur les différents points de sa surface.** — Du Buat[1], l'auteur de cette *troisième* méthode, l'appliqua à la résistance au mouvement des navires dans l'eau. La pression, positive ou négative, qu'éprouvaient les différents points de la carène immergée était mesurée au moyen d'un tube de Pitot.

J'ai fait, par une méthode analogue, une longue série d'expériences pour mesurer la pression de l'air aux différents points de la surface antérieure et de la surface postérieure d'un disque animé de vitesses connues. Ces expériences ont donné des résultats de différentes sortes :

Elles ont montré, en premier lieu, que les corps en mouvement dans l'air entraînent avec eux un certain volume de ce fluide qui leur forme une proue semi-ovoïde. Les choses se passent donc, dans l'air, comme Du Buat l'avait noté dans ses expériences sur les mouvements des corps dans l'eau[2].

1. Du Buat, *Principes d'hydraulique*, t. II, 3e partie.

2. Dans ses admirables expériences sur la photographie des projectiles animés de grandes vitesses, Mach a montré la forme et les dimensions de l'enveloppe d'air qui les accompagne.

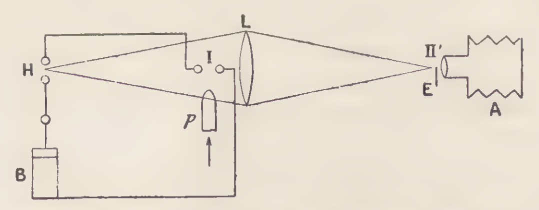


Fig. 117. — Disposition de l'appareil de Mach pour photographier les projectiles en mouvement.

Le projectile, *p* (fig. 117), par son passage en I, produit une étincelle d'induction en H. A la clarté instantanée de cette étincelle, l'image du projectile concentrée par la loupe L se peint sur la plaque sensible de l'appareil photographique A.

Sur la plaque, se voit une image dans laquelle le changement de réfrin-

Elles ont fait voir également que la pression de l'air est positive en avant du corps qui s'y meut, et qu'elle est négative en arrière. La résistance de l'air doit donc être considérée comme la somme algébrique des pressions positive et négative que le corps éprouve, multipliée par la surface de ce corps.

J'ai observé enfin que, sur les bords d'un disque en mouvement dans l'air, la pression n'a plus la même valeur que sur le reste de la surface du disque ; ses valeurs, positive en avant et négative en arrière, sont moindres : cela tient à ce que, sur les bords du disque, l'air comprimé s'écoule avec facilité et passe de la face antérieure à la face postérieure. Cette diminution dans la valeur, positive ou négative, de la pression de l'air sur les bords du disque constitue une diminution de la résistance au mouvement. Et comme cet effet ne se produit que sur les bords du disque il s'ensuit que, plus ces bords auront d'étendue par rapport à la surface, plus il y aura diminution de la résistance totale de l'air. Or, plus une surface est grande, moins ses bords ont d'étendue relative; la diminution marginale

gence rend visible l'air comprimé dans le voisinage du projectile. La figure 118 donne une représentation théorique de ce phénomène. Le projectile *pp*, animé d'un mouvement dont la flèche intérieure marque la

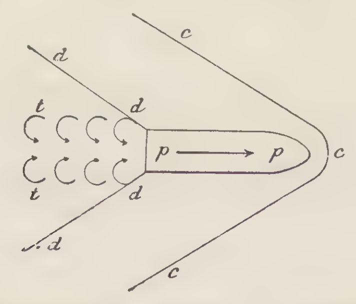


Fig. 118. — Figure théorique montrant l'aspect de l'air entraîné par un projectile.

direction, apparaît entouré d'une masse d'air dont les contours affectent la forme parabolique; et dans le sillage du projectile existent des remous. (Voir pour les détails des expériences E. Mach et P. Salcher, *Fixation, par la photographie, des phénomènes produits dans l'air par le passage des projectiles*. Trad. dans le *Journal de physique*, 1888, p. 500.)

de pression se produira donc surtout pour les petites surfaces[1].

Sans entrer ici dans le détail de ces expériences qui ont été publiées ailleurs *in extenso*[2], je vais exposer sommairement les dispositions employées et les précautions dont je me suis entouré pour évaluer avec précision les vitesses et les pressions.

§ 131. **De l'exploration manométrique des pressions sur les divers points de la surface d'un disque tournant.** — L'appareil qui m'a servi est représenté (fig. 119). Un axe vertical tourne uniformément sous l'action d'un câble sans fin passant dans une des gorges de la poulie *p*. Sur cet axe sont adaptés, d'une part un

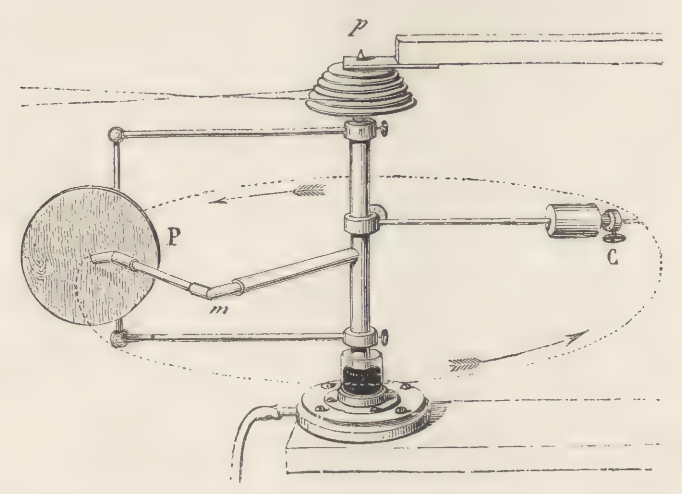


Fig. 119. — Disque tournant, avec le manomètre explorant la pression de l'air en différents points de sa surface.

cadre métallique auquel s'articule le plan circulaire P formé d'une mince planchette de bois ; d'autre part un contrepoids C. Celui-ci est réglé dans sa position, de manière à équilibrer le disque P lorsque le système tourne, c'est-à-dire que la force centrifuge de C doit être égale à celle du disque P.

1. On s'explique, de cette façon, l'excès relatif de résistance que présentaient les palettes de grandes dimensions, dans les expériences de Hutton, de Borda et de Duchemin.

2. Marey, *Expériences sur la résistance de l'air, pour servir à la physiologie du vol des oiseaux.* Annales des Sciences naturelles, 1869 et 1872.

Enfin, sur le même axe central, est adapté le tube manométrique m, dont l'extrémité ouverte peut être portée en différents points de l'une ou de l'autre face du disque P ; à cet effet, les différentes pièces dont ce tube est formé glissent et tournent en tous sens, les unes dans les autres.

La pression qui s'exerce sur l'extrémité du tube manométrique se rend au manomètre par l'itinéraire suivant : elle entre dans l'axe creux qui est formé de deux tubes concentriques, dont l'extérieur seul tourne sur lui-même. Un autre tube intérieur, servant de pivot central à ce mouvement, est percé de trous par lesquels la pression passe à son intérieur, d'où elle se transmet, à travers le pied de l'instrument, pour se rendre par un tube en caoutchouc au manomètre qui doit la mesurer. Entre le manchon extérieur et le tube intérieur qui forme l'axe de l'appareil, une clôture est établie qui, tout en laissant entière liberté au mouvement rotatif, empêche la pression de l'air de se perdre au dehors. Cette clôture est formée par un bain de mercure dans lequel plonge l'extrémité inférieure du manchon tournant. L'intérieur de celui-ci est séparé de l'air extérieur par le mercure, comme le gaz contenu dans un gazomètre est séparé de l'air extérieur par l'eau dans laquelle plonge la cloche de l'instrument.

La disposition générale de l'expérience est représentée par la figure 120. On y voit comment la rotation uniforme du disque est obtenue au moyen d'un câble actionné par un mouvement d'horlogerie H. Ce dernier est mû par un poids ; un régulateur de Foucault assure la parfaite uniformité du mouvement.

Enfin le manomètre M est d'une sensibilité extrême : ses indications ont 30 fois plus d'amplitude que celles d'un manomètre à eau. Cet instrument imaginé par Kretz et de Mondesir est formé de deux liquides de densités peu différentes ; il donne une dénivellation de 30 centimètres pour un changement de pression d'un centimètre d'eau.

Applications. — Les expériences qui viennent d'être rapportées ont donné un résultat qui s'applique directement à la phy-

siologie du vol des oiseaux. Elles montrent qu'une perte de pression se fait sur les bords des surfaces qui se meuvent dans l'air,

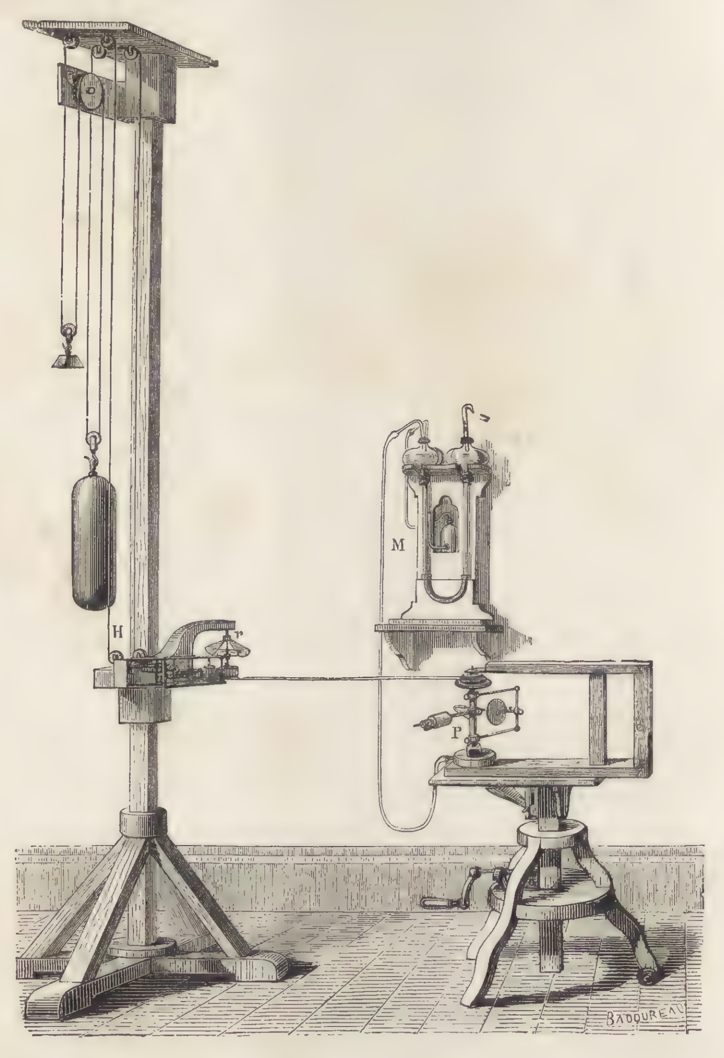


Fig. 120. — Disposition générale de l'expérience dans laquelle on mesure manométriquement la pression, au voisinage d'une surface en mouvement dans l'air.

et que cette perte est proportionnellement plus grande pour les petites surfaces que pour les grandes : d'où l'on peut conclure

que, toutes proportions gardées, les petits oiseaux trouvent, à égale vitesse, moins d'appui sur l'air que les grands. Ils doivent, en conséquence, racheter par une plus grande vitesse de l'aile cette cause d'infériorité au point de vue du vol.

§ 132. **Mesure du coefficient de la résistance de l'air.** — Dans les expériences qui viennent d'être décrites, il ne suffisait pas de lire l'indication du manomètre correspondant aux différentes vitesses de rotation et aux différents points de la surface explorée. Ces indications étaient complètement masquées par un phénomène singulier : une aspiration qui se produisait dans le tube manométrique.

Lorsque de l'eau est contenue dans un tube qu'on fait tourner rapidement, la force centrifuge projette cette eau à distance. Un effet analogue a lieu quand le tube qui tourne est rempli d'air : celui-ci est partiellement expulsé par la force centrifuge, et il se produit dans le tube une aspiration qui, manifestation de la force centrifuge, croît et décroît comme elle suivant la formule $F = \frac{mv^2}{r}$; c'est-à-dire qu'elle est proportionnelle à la masse m du gaz en mouvement, au carré de sa vitesse v^2, et inversement proportionnelle au rayon r du cercle parcouru.

Or, dans le mouvement circulaire, la pression que l'inertie de l'air produit devant le plan en mouvement tend à se faire sentir dans le tube manométrique, avec une force précisément égale et contraire à la force centrifuge qu'elle neutralise entièrement. De sorte que, *pour toutes vitesses de rotation, un manomètre plongeant dans l'air comprimé au devant d'un plan tournant marque toujours zéro.* Mais si l'on met l'ouverture du tube en rapport avec la face postérieure du plan tournant, le manomètre indique une pression négative très forte ; les effets de la force centrifuge s'ajoutent en effet à l'aspiration due au mouvement du plan.

L'expérience montre que la force centrifuge est précisément égale à l'aspiration produite, en arrière du plan, par le mouvement

de translation[1]. Cette relation, qui avait déjà été signalée par Athanase Dupré[2], permettait d'obtenir avec une facilité singulière la valeur de la résistance de l'air, à toutes vitesses, contre un plan mince animé de translation.

En effet, on peut considérer que la résistance d'un plan qui se meut dans l'air est due à la somme algébrique des pressions égales et de signes contraires qui s'exercent sur ses deux faces. Alors l'aspiration que le manomètre constate en arrière du plan tournant et qui, à toutes les vitesses, est précisément égale à cette somme algébrique, représentera la résistance que l'air oppose à chaque point de la surface qui la reçoit. En multipliant cette pression par la surface sur laquelle elle agit, on aura la résistance totale. Enfin, en calculant cette résistance pour une surface d'un mètre, animée d'une vitesse d'un mètre par seconde, on aura le coefficient de résistance de l'air. La valeur de ce coefficient K, obtenue de cette manière, a été K = 0 kil. 130.

Dans cette évaluation, on ne tient pas compte de la perte de pression qui se produit sur les bords du disque par suite des remous dont il a été question plus haut. On peut expliquer ainsi, que le chiffre obtenu dans mes expériences soit supérieur à celui qui a été trouvé sur les corps en mouvement et qui tous étaient affectés de la *perte marginale* de résistance.

Pour mesurer les changements de la résistance de l'air en fonction de la vitesse, j'ai fait une série de déterminations dans lesquelles les vitesses et les pressions étaient mesurées avec les soins les plus minutieux : les *vitesses*, par les procédés de la chronographie[3] ; les *pressions* avec un manomètre enregistreur très soigneusement réglé.

En représentant (fig. 121) sous forme de courbe la loi des chan-

1. Marey, *Mémoire cité*, p. 15. *Bibliothèque des Hautes-Études*, XIII, 1, article nº 2, p. 15.

2. Athanase Dupré, *Théorie mécanique de la chaleur*, p. 441. « La pression « produite par la force centrifuge seule (dans un tube rayon) est moyenne « proportionnelle entre la pression produite par le mouvement en arrière « et par le mouvement en avant. »

3. Voir pour l'emploi de ces appareils *La Méthode graphique*, p. 239.

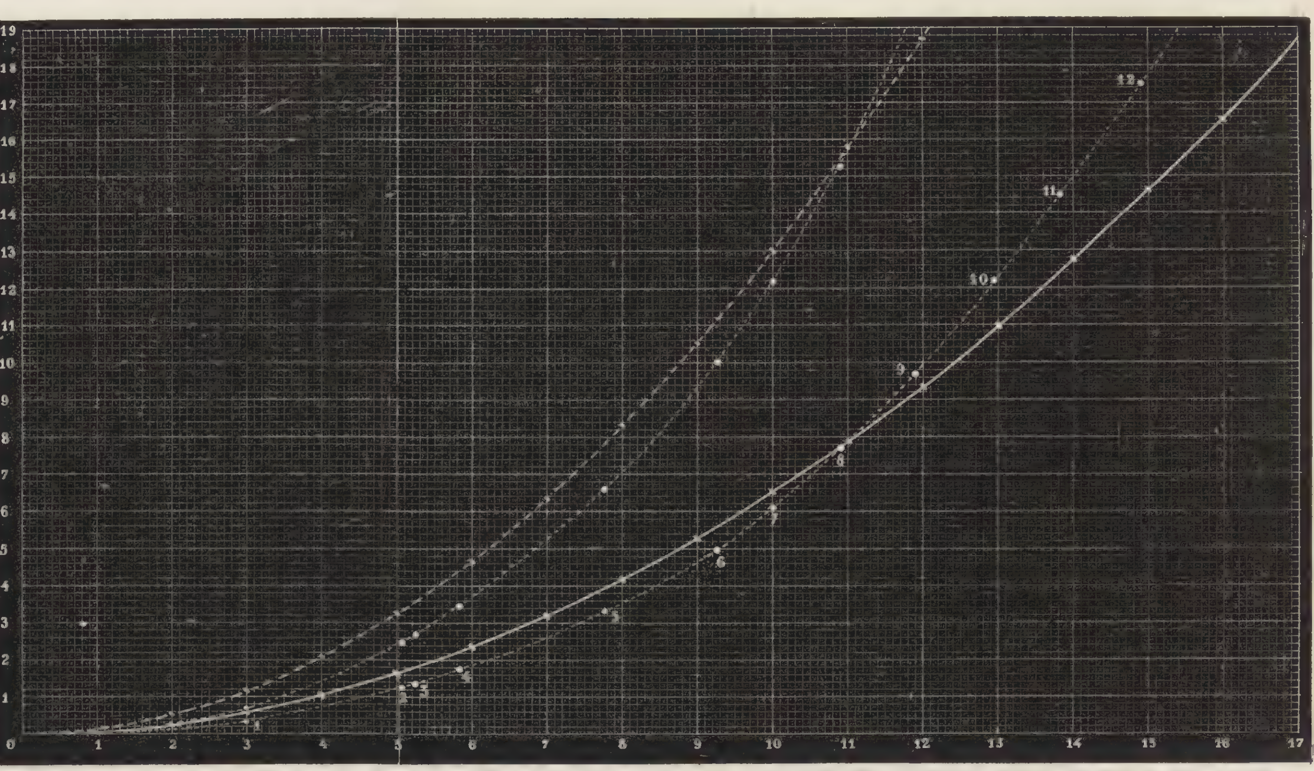


Fig. 121. — La courbe construite par une série de points dont chacun porte un numéro d'ordre exprime l'accroissement de la presion au devant d'un plan d'un mètre de surface, pression calculée d'après l'aspiration centrifuge. — La courbe construite au-dessus de celle-ci, par une série de points sans numéros d'ordre, a des ordonnées doubles de la précédente ; ce serait celle de la résistance de l'air d'après les expériences. — La courbe pleine exprime la pression de l'air au-devant d'un plan, en admettant, pour une vitesse d'un mètre, une pression de 65 grammes par mètre carré et en supposant que cette pression croisse comme le carré des vitesses. — Enfin, la courbe supérieure à traits interrompus serait, d'après la même hypothèse, celle de la résistance de l'air.

gements de résistance de l'air en fonction de la vitesse, on voit que cette courbe, formée par points, ne présente aucune irrégularité dans sa forme, tout en passant précisément par le centre des points expérimentalement déterminés.

Si l'on trace, à côté de cette courbe expérimentale, la courbe théorique dans laquelle, pour des vitesses régulièrement croisantes, le coefficient K serait multiplié par le carré de la vitesse, on obtient une parabole parfaite. Il résulte de la comparaison de ces deux courbes, que la résistance de l'air, expérimentalement déterminée, croît un peu moins vite que le carré de la vitesse pour les vitesses faibles, comprises entre 0 et 10 mètres à la seconde, tandis qu'elle croît plus vite que le carré de la vitesse, à partir de 10 mètres par seconde.

§ 133. **Au point de vue de la résistance éprouvée, il est indifférent que le corps solide soit en mouvement dans un air calme, ou qu'il soit immobile dans un air animé de mouvement.** — Cette proposition est des plus importantes ; elle permettra d'appliquer aux problèmes du *vol à voile* les résultats d'expériences faites sur des corps de différentes formes, animés de mouvements dans un air calme[1]. Il n'est guère possible, en effet, d'étudier la résistance qu'éprouveraient des corps soumis à un vent régulier et de vitesse connue ; de puissantes souffleries pourraient seules remplir ces conditions, qui n'existent guère dans les mouvements atmosphériques.

1. La réversibilité des conditions du mouvement n'est cependant pas admise par tous les auteurs : Goupil (*La locomotion aérienne*, Charleville, 1884, p. 60) et de Louvrié (*L'aéronaute*, 1876, p. 185) ont soutenu qu'il n'est pas indifférent qu'un solide se meuve dans l'air ou que l'air vienne agir contre ce solide. Mais la plupart des auteurs admettent la réversibilité des conditions du mouvement.

Cette théorie semble du reste s'imposer, si l'on considère que, pour une même vitesse, le même travail est nécessaire, soit pour vaincre l'*inertie*, soit pour détruire la *force vive* d'une même masse d'air.

CHAPITRE XIV

DE LA RÉSISTANCE QUE L'AIR OPPOSE AUX MOUVEMENTS DE CORPS DE DIFFÉRENTES FORMES

Influence de la forme des corps sur la résistance qu'ils éprouvent dans l'air. — Formes de moindre résistance. — Formes de plus grande résistance. — Résistance de l'air au mouvement d'un plan qui se déplace autour d'un de ses bords. — Centre d'action de l'air sur l'aile. — De l'action de l'air sur les surfaces courbes. — Résistance de l'air aux surfaces inclinées sous un certain angle, par rapport à la direction de leur mouvement. — Applications prématurées du calcul au problème du vol.

§ 134. **Influence de la forme des corps sur la résistance qu'ils éprouvent dans l'air.** — L'expérience a montré depuis longtemps aux constructeurs de navires, que les formes effilées des carènes sont favorables à leur bonne marche, c'est-à-dire que, pour une même force motrice, les bateaux aux formes fines acquièrent plus de vitesse; ils éprouvent donc moins de résistance à se mouvoir dans l'eau.

§ 135. **Formes de moindre résistance.** — La théorie montre que, pour éprouver le moins possible de résistance, la carène d'un bateau ne doit pas seulement avoir une proue aiguë, mais qu'une poupe effilée n'est pas moins importante : cette forme, en effet, supprime les remous à l'arrière du bateau.

Si l'on examine la forme ordinaire des poissons, on voit que leur tête est toujours beaucoup plus massive que l'arrière de leur corps; l'expérience montre précisément que cette forme est la plus avantageuse. D'après Froude, Rankine et Saint-Venant, les corps pisciformes éprouveraient, à l'arrière, une poussée provenant du retour des molécules fluides déplacées par

le corps en mouvement, et cette poussée compenserait presque exactement la résistance à l'avant. De tels corps n'éprouveraient donc, dans l'eau, que des résistances latérales ou de frottement.

En l'absence d'expériences directement instituées sur des corps de différentes formes se mouvant dans l'air, la plupart des auteurs se croient autorisés à admettre que le corps de l'oiseau, présentant des formes carénées très analogues à celles du poisson, doit éprouver dans l'air des résistances extrêmement faibles. Il suffirait donc d'une force très petite, dirigée horizontalement, pour imprimer à l'oiseau une translation très rapide.

Wenham[1] a imaginé une méthode qui permettra de mesurer la résistance qu'éprouvent dans l'air les corps d'oiseaux de différentes formes. Cet auteur soumettait à l'action du vent deux solides de formes diverses, placés à l'extrémité de deux bras de leviers disposés de telle façon que la pression exercée par l'air sur l'un de ces corps fût équilibrée par la pression exercée sur l'autre. Le corps qui éprouvait le moins de résistance devait être placé au bout du bras de levier le plus long.

Les expériences de Wenham ont montré que la résistance qu'un corps éprouve dans l'air n'est point proportionnelle à la projection de ce corps perpendiculairement à l'axe du mouvement, ou, pour employer une expression usitée dans la marine, à son *maître-couple*. Ainsi, un disque plat et un cône dont la base aurait la même surface que le disque et qui présenterait sa pointe au vent éprouvent des résistances très inégales. Pour le cône, la résistance est d'autant plus faible que sa hauteur est plus grande, c'est-à-dire que sa pointe est plus aiguë.

On voit qu'il ne serait pas difficile d'appliquer la méthode de Wenham pour mesurer la résistance que des oiseaux empaillés présenteraient à l'action du vent, en comparant cette résistance à celle qu'éprouverait une surface plane d'une certaine étendue.

§ 136. **Formes de plus grande résistance.** — Si le corps de l'oiseau n'éprouve que peu de résistance dans l'air, il n'en est

1. Wenham, *L'Aéronaute*, 1876, p. 159.

pas de même des ailes, car celles-ci trouvent dans l'air le point d'appui nécessaire pour soutenir l'oiseau et pour lui imprimer sa vitesse, ainsi qu'on le dira plus loin.

Les ailes, il est vrai, quand elles se présentent à l'air sous certaines incidences, y trouvent très peu de résistance. On a vu qu'avec les ailes légèrement serrées près du corps, l'oiseau prend des vitesses très grandes. C'est dans cette attitude que les Rapaces fondent sur leur proie avec une rapidité qui ne permet pas à l'œil de les suivre (§ 4). Mais que l'oiseau, au lieu de fendre l'air du tranchant de ses ailes, étale au contraire celles-ci comme pour s'en faire un parachute, aussitôt on le voit ralentir sa vitesse et descendre avec une grande lenteur.

Les expériences rapportées au chapitre précédent expliquent déjà ces variations de la résistance que l'aile éprouve dans l'air. La surface empennée, quand elle s'oriente perpendiculairement à la direction de son mouvement, se comporte comme ces plans minces, de bois ou de carton, dont la résistance a été si souvent mesurée, au moyen d'appareils rotatifs.

Toutefois, l'aile diffère, à bien des égards, de ces palettes plates, emmanchées au bout d'un long rayon tournant : sa surface est bien plutôt comparable à celle d'un triangle ; en outre, elle n'est pas plane : la forme arquée de son squelette et la cambrure de ses rémiges lui donnent une concavité assez prononcée. Or, cette concavité correspond précisément à la face inférieure, à celle qui agit sur l'air. Ces caractères du mouvement et de la forme de l'aile ont, sur la résistance qu'elle rencontre dans l'air, une influence qu'il importe de connaître.

§ 137. **Résistance de l'air au mouvement rotatif d'un plan qui se déplace autour d'un de ses bords.** — Dans les expériences faites sur des surfaces animées de mouvements rectilignes, tous les points de ces surfaces avaient la même vitesse ; on cherchait même à s'approcher de ces conditions, dans les mouvements circulaires imprimés à des palettes minces, en plaçant ces palettes au bout d'un long rayon monté sur un axe central.

L'aile de l'oiseau serait plutôt assimilable à une surface

triangulaire, allongée, qui tournerait autour de son petit côté. Dans ce genre de mouvement, les points inégalement éloignés de l'axe de rotation sont animés de vitesses inégales; ils trouvent dans l'air des résistances qui croissent comme le carré de leur vitesse, c'est-à-dire de leur distance à l'axe du mouvement.

Toutes ces résistances inégales, agissant sur divers points de l'aile, ont une résultante, c'est-à-dire qu'elles pourraient être remplacées par une force unique appliquée en un certain point de la longueur de l'aile. C'est un des problèmes les plus importants de la théorie mécanique du vol, que la détermination du point d'application de la résultante des pressions de l'air sur l'aile.

Les géomètres ont résolu des problèmes analogues, en considérant des plans minces de formes régulières, *triangles* ou *rectangles*, tournant autour d'un de leurs côtés. Ils ont assigné au *centre d'action* de la résistance de l'air les positions suivantes :

1° Pour un *rectangle* qui tourne autour de l'un de ses côtés, le centre d'action de l'air se trouve sur la ligne élevée perpendiculairement sur le milieu de ce côté et aux 3/4 de la longueur de cette ligne, en comptant à partir de l'axe du mouvement.

2° Pour *le triangle*, le centre d'action de l'air serait sur la ligne qui, partant du milieu du côté autour duquel se fait le mouvement rotatif, atteindrait l'angle opposé, et aux 3/5 de la longueur de cette ligne, en comptant à partir de l'axe du mouvement[1].

1. Prechtl a évalué tout autrement le *point d'application de la résistance de l'air;* il a cru pouvoir le confondre avec le point de *moyenne résistance.* Kargl lui reproche cette confusion comme une erreur; et pour montrer la différence qui résulterait, dans la détermination du moment de la résistance de l'air, suivant qu'on identifierait ou non ces deux points, il prend pour exemple deux surfaces de forme différente, le rectangle et le triangle. En appelant n la distance du point d'application de la résistance de l'air, on trouverait les valeurs suivantes :

Pour le rectangle	d'après Prechtl, $n = 0{,}63$
	d'après Kargl, $n = 0{,}57$
Pour le triangle	d'après Prechtl, $n = 0{,}556$
	d'après Kargl, $n = 0{,}479$

En réalité, l'aile d'un oiseau n'est ni un rectangle ni un triangle; sa forme est intermédiaire à celle de ces deux figures. On se rapprochera donc de la vérité en prenant, pour position du centre d'action de l'air, un lieu intermédiaire aux deux points ci-dessus indiqués. Ainsi, on peut admettre que le centre d'action de l'air sur l'aile est sensiblement aux 2/3 de sa longueur comptée à partir de l'articulation de l'épaule.

Au siècle dernier, Silberschlag[1] admettait que le *centre d'action de l'aile*, ou point d'application de la résistance totale de l'air, est situé dans le voisinage du carpe[2], un peu en dedans et en arrière de cette région.

Mais c'est aux 2/3 de la longueur de l'aile que l'on doit placer le centre d'action de la résistance de l'air d'après Kargl[3], Pénaud[4] et la plupart des auteurs qui, plus récemment, se sont occupés de ce problème.

§ 138. **De l'action de l'air sur les surfaces courbes.** — Cayley semble avoir, le premier, tenu compte de la forme concave de l'aile, qu'il considère comme accroissant beaucoup la résistance qu'elle rencontre dans l'air. Mais, pour apprécier exactement les effets de la courbure de l'aile, les expériences des physiciens sont encore insuffisantes : elles ont porté, jusqu'ici, sur des courbes simples et de forme invariable[5], tandis que la surface de l'aile

1. Silberschlag, *Von dem Fluge der Vögel* (Schriften den Berlinischen Gesellschaft, Naturforschende Freunde. B^d II, 1781-1784, p. 214).

2. Il serait curieux que ce point fût fixe sur toutes les formes d'ailes; en tout cas, le contrôle de la théorie de Silberschlag mérite de tenter des calculateurs.

3. Kargl, *Zur Mecanik des Fluges* (*Civil ingénieur*, B^d XVI. Zurich, 1870).

4. Pénaud, *L'aéronaute*, 1873, p. 65.

5. Poncelet (*Introduction à la mécanique industrielle*) considérant le cas d'une surface courbée suivant une seule de ses dimensions, comme le serait une gouttière, admet que la résistance éprouvée par le côté concave agissant contre l'air est très peu supérieure à celle que rencontrerait une surface plane égale à la projection de cette gouttière.

Mais si la surface est concave dans les deux sens, la résistance qu'elle éprouve est (surtout pour les petits angles) notablement supérieure à celle d'une surface plane de même projection. Elle serait sensiblement égale à celle que présenterait la même surface courbe développée sur un plan.

est non seulement compliquée, mais change à chaque instant, à cause de la flexibilité des rémiges qui se tordent et se détordent à tout changement de la pression de l'air contre leur surface. Or, ces changements de pression sont liés à la rapidité plus ou moins grande du mouvement de l'aile rameuse.

On pourra sans doute, quelque jour, en se servant des ailes desséchées d'un oiseau auxquelles on imprimera des mouvements convenables, faire des mesures de la résistance de l'air plus directement applicables à l'explication du mécanisme du vol.

§ 139. **Résistance de l'air aux surfaces inclinées sous un certain angle, par rapport à la direction de leur mouvement.** — Pour se rapprocher, de plus en plus, des conditions véritables du vol, on est conduit à considérer le cas où une surface rencontre l'air sous un certain angle. On verra, en effet, que l'action de l'aile rameuse sur l'air qu'elle frappe, aussi bien que celle du vent qui souffle contre l'aile voilière, sont toujours plus ou moins obliques.

De nombreux travaux ont été faits pour résoudre un problème analogue : l'action de l'air sur les voiles des navires orientées sous différents angles par rapport à la direction du vent. Ces travaux éclairent beaucoup le mécanisme du vol des oiseaux.

Newton supposait que les molécules de l'air, après avoir frappé une surface oblique, font un angle de réflexion égal à l'angle d'incidence; mais son hypothèse n'était pas soutenable en présence du résultat de certaines expériences.

Vince, Hutton, Thibault, Borda, Piobert, Morin et Didion, etc., ont montré, par leurs expériences, que la résistance de l'air décroît de plus en plus, à mesure que l'angle formé par le plan avec sa trajectoire devient plus petit. Cette résistance, dirigée normalement au plan, peut être décomposée en deux forces, dont l'une serait opposée à la direction du mouvement, tandis que l'autre serait perpendiculaire à cette direction et tendrait à dévier le plan de sa route.

Soient (fig. 122) cinq plans rectangulaires diversement inclinés et dont les tranches seules sont visibles pour l'obser-

vateur sous forme de lignes 1, 2, 3, 4 et 5 plus ou moins inclinées. Supposons que le vent souffle suivant la direction des flèches représentées dans la figure. Ces flèches se mouvant toutes, parallèlement entre elles et à des distances égales les unes des autres, représenteront les files de molécules d'air dont le mouvement produit le vent.

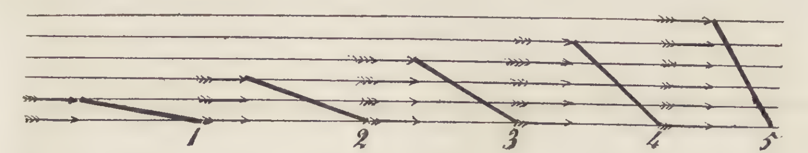


Fig. 122. — Figure théorique montrant que la résistance de l'air à un plan incliné est proportionnelle au sinus de l'angle que ce plan forme avec la direction du mouvement.

On voit clairement que chacun des cinq plans inclinés sera frappé par un nombre de flèches, c'est-à-dire de molécules d'air, d'autant moindre, que ce plan fera un angle plus petit avec la direction du vent. Ainsi le plan 1, très incliné, ne reçoit que deux files de molécules, tandis que le plan 2 en reçoit trois et le plan 5, presque vertical, en reçoit six.

Or, si l'on considère que la pression de l'air est produite par la *force vive* des molécules en mouvement, il est naturel d'admettre que cette pression doit être d'autant plus grande, que le nombre des molécules qui frappent le plan est lui-même plus grand ; il s'ensuit que la résistance de l'air contre chacun des cinq plans inclinés aura des valeurs croissantes, à mesure que l'angle sera plus ouvert. C'est ce qu'on exprime en disant que la résistance de l'air est proportionnelle au *sinus* de l'angle que la surface frappée forme avec la direction du vent[1].

Cette résistance, dont la valeur totale varie suivant l'angle que fait le plan avec la direction du mouvement, donne lieu elle-même à deux poussées, l'une verticale et l'autre horizontale, dont les valeurs dépendent aussi de ce même angle.

Soient (fig. 123, A, B, C) trois angles différents, formés par le

1. Ceci s'applique indifféremment au cas où le plan se meut dans l'air calme, et à celui où il est immobile dans un air animé de mouvement.

plan incliné *or* avec la direction horizontale du vent. Dans ces trois cas, la poussée horizontale sera proportionnelle au *sinus* de l'angle *sor*, c'est-à-dire à la longueur *rs*; la poussée verticale sera proportionnelle au *cosinus* du même angle, c'est-à-dire à *so*.

On voit que les valeurs de ces deux poussées varient en sens inverse l'une de l'autre. Pour de petits angles, en A par exemple, la résistance de l'air est presque entièrement employée à produire la poussée verticale. En B, sous l'angle de 45° où le

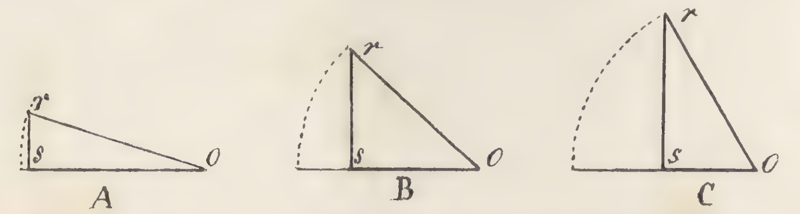


Fig. 123. — Variations du sinus et du cosinus pour des angles de différentes ouvertures.

sinus et le *cosinus* sont égaux, les deux poussées sont de même valeur; enfin, pour les grands angles, en C par exemple, le cosinus est très petit par rapport au sinus, de sorte que la poussée verticale est très faible et la poussée horizontale très forte.

Goupil[1] a établi, pour les surfaces planes et carrées, la formule empirique suivante : $P = 0{,}13\ SV^2 \sin \alpha$, dans laquelle S est la surface, V la vitesse dont elle est animée et α l'angle qu'elle forme avec la direction du mouvement. Les expériences de cet auteur sur les plans inclinés l'ont conduit à donner une représentation graphique très saisissante de la manière dont varient les deux composantes de la résistance de l'air, suivant l'angle que forme la surface S avec la direction du vent. La figure 124 a été construite d'après le résultat de ces expériences.

Le vent est supposé horizontal et de force constante. La com-

1. Goupil, *La locomotion aérienne* (Charleville, 1884, p. 23). — Déjà Tatin avait traduit graphiquement les variations des deux composantes de la résistance de l'air pour des plans, d'obliquités variables, mais de projection constante (*Travaux de mon laboratoire*, 4e année, 1897, p. 269).

posante verticale de la résistance de l'air est désignée sous la lettre A (force *aviatrice*[1] ou *ascensionnelle*), tandis que la lettre R représente la résistance à la translation.

Les ordonnées passant par les diverses divisions du quart de cercle correspondent aux sinus des angles de 10°, 20°,...90°.

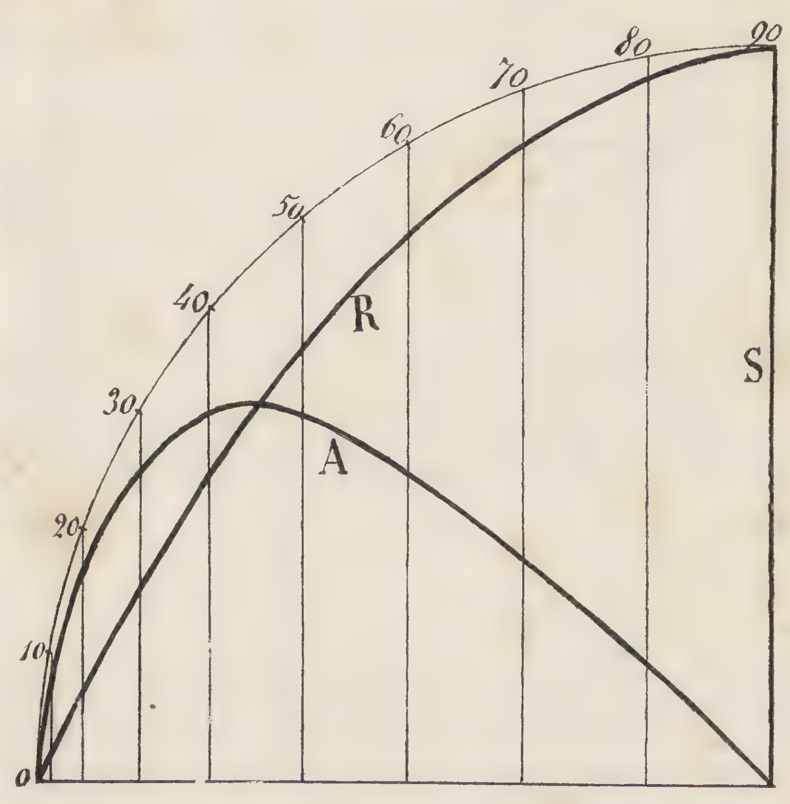


Fig. 124. — Courbes des variations de la force soulevante A et de la résistance horizontale de l'air R, pour différentes inclinaisons de l'aile (d'après Goupil).

Chacun de ces sinus coupe les courbes A et R en des points dont les hauteurs expriment les valeurs des deux composantes de

1. Le mot de *force aviatrice* introduit par Duroy de Bruignac exprime, sous une forme concise, la poussée ascendante que l'air exerce sous les ailes des oiseaux, rameurs ou voiliers, et qui joue un si grand rôle dans le mécanisme du vol.

l'action de l'air contre un plan incliné sous l'angle auquel ce sinus correspond.

La simple inspection de la figure 124 renseigne bien mieux que les tableaux numériques, sur la manière dont varient les deux composantes de la résistance de l'air, suivant l'angle que fait l'aile avec la direction du vent *absolu* ou *relatif*.

Pour estimer la valeur absolue de ces deux composantes, il faut connaître la surface des ailes, la vitesse du vent, absolu ou relatif, qui les rencontre, et l'angle que fait le plan des ailes avec la direction de ce vent.

Nous rencontrerons souvent des problèmes de ce genre à propos du *vol plané* ou du mécanisme de la *remontée de l'aile*. Pour en donner dès maintenant une idée sommaire, considérons le cas d'un oiseau animé d'une vitesse de translation horizontale et présentant obliquement son aile au vent, sous un angle très aigu (fig. 125).

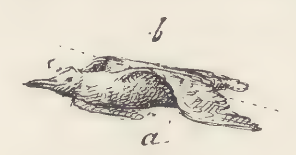


Fig. 125. — Figure théorique montrant l'inclinaison de la surface de l'aile de l'oiseau.

Comme cet angle est très petit, la composante de la résistance de l'air à la translation de l'oiseau (R, fig. 124) est très faible; tandis que presque toute la résistance de ce fluide formera l'autre composante A, qui soutient l'oiseau contre la pesanteur.

Si cette composante A est suffisante, c'est-à-dire si le vent, absolu ou relatif, contre lequel vole l'oiseau, est assez fort, l'oiseau glissera sur l'air pendant un temps plus ou moins long, sans perdre de sa hauteur. Dans les cas de ce genre, on calcule la valeur de la composante A, d'après la formule $A = KSV^2 \sin \alpha$.

C'est encore Cayley [1] qui appliqua, le premier, ces considérations

1. Cayley, Rapport de la Société aéronautique de la Grande-Bretagne, 1869. Traduit dans l'*Aéronaute*, 1876, p. 203.

Cette théorie a été admise par plusieurs membres de la *Société française de navigation aérienne*. Pénaud, s'appuyant sur les expériences faites par Thibault, à Brest, en 1826, et sur ses expériences personnelles, admettait,

à l'explication du vol des oiseaux. Voici, en mesures anglaises, les valeurs que cet auteur attribuait à la résistance de l'air dans certains exemples particuliers.

pour les petits angles, la proportionnalité de la résistance de l'air au simple sinus de l'angle α. Sa formule est :

$$R = KdSV^2 \sin \alpha$$

dans laquelle K est un coefficient numérique, d la densité du fluide, S la surface, V la vitesse dont elle est animée, α l'angle formé par le plan avec la direction du mouvement. Cette formule ne s'applique pas aux très faibles vitesses, à cause de la viscosité du fluide. Elle ne paraît pas non plus s'appliquer aux vitesses très grandes, à celle des projectiles, par exemple.

Elle a été vérifiée par Pénaud, au moyen de moulinets à palettes dont les angles étaient réglés depuis 3°26′ jusqu'à 21°10′. Cette loi se vérifie pour des angles d'autant plus grands que les surfaces sont plus larges et que leur forme s'approche plus de celle d'un losange ou d'une ellipse dont le grand axe est perpendiculaire à la translation.

De Louvrié donne à peu près la même valeur à la résistance de l'air à la translation des plans obliques. Il admet, d'après la formule de Bossut, que si la surface S est inclinée sur la direction du mouvement, et fait avec cette direction un angle d'incidence α, la résistance au mouvement de translation devient :

$$R = KSV^2 \frac{2 \sin^2 \alpha}{1 + \sin^2 \alpha}.$$

Or, cette résistance n'est qu'une des composantes de la pression normale M; il suffit donc de diviser cette composante par sin α pour obtenir la valeur de la pression normale au plan et l'on a :

$$M = KSV^2 \frac{2 \sin \alpha}{1 + \sin^2 \alpha}.$$

Pour obtenir l'autre composante, il suffit de multiplier la pression normale par cosinus α et l'on aura :

$$P = KSV^2 \frac{2 \sin \alpha}{1 + \sin^2 \alpha} \cos \alpha = M \cos \alpha.$$

A l'appui de cette théorie de la résistance de l'air aux plans inclinés, de Louvrié montre la concordance des résultats expérimentaux de Bossut,

Une surface mince, d'*un pied carré*, se mouvant perpendiculairement à son plan, trouvera dans l'air une résistance d'*une livre*, lorsqu'elle aura une vitesse de 23 *pieds* 6 *pouces* par seconde ; la même chose aura lieu si cette surface immobile est frappée par un vent de 23 pieds 6 pouces de vitesse.

Mais si cette surface est inclinée sur l'horizon, de façon que le vent, absolu ou relatif, en frappe obliquement la face inférieure, la résistance de l'air n'aura plus qu'une valeur proportionnelle au sinus de l'angle du plan avec l'horizon. Pour un corbeau qui pèse *une livre* et dont les ailes ont environ un pied de surface, Cayley estime que ces ailes, orientées sous un angle de 6° avec l'axe du vol, soutiendront le poids du corps, quand la vitesse de translation de l'oiseau sera de 35 pieds par seconde.

Cette vitesse est bien, à peu près, celle que l'observation indique ; mais, en réalité, l'oiseau semble présenter son aile sous un angle plus faible que 6°.

Cayley admet que la forme concave de l'aile contribue à accroître la composante verticale de la résistance de l'air et à lui donner une valeur plus grande que celle que le calcul donne pour les surfaces planes.

Il faut noter que, dans l'esprit de Cayley, ces considérations s'appliquaient exclusivement au planement de l'oiseau sur l'air[1]

au moyen de mouvements rectilignes, avec ceux de Vince, Hutton et Thibault, au moyen de mouvements circulaires.

ANGLES D'INCIDENCE α.	90°	80°	70°	60°	50°	40°	30°	20°	10°
Vince	1,000	0,964	0,916	0,828	0,669	0,506	0,331	0,157	0,048
Hutton	1,000	0,989	0,956	0,886	0,768	0,579	0,347	0,156	0,046
Thibault	1,000	0,985	0,946	0,830	0,771	0,588	0,382	0,181	0,057
Résistances calculées d'après $\frac{2 \sin^2 \alpha}{1 + \sin^2 \alpha}$	1,000	0,984	0,937	0,857	0,739	0,548	0,400	0,209	0,058

1. A l'appui de cette théorie des effets de la résistance de l'air sur les plans inclinés, Cayley rapporte l'expérience suivante :

Une sorte de cerf-volant, convenablement lesté et abandonné à lui-même,

et au vol à voile, tandis que nous verrons la composante verticale jouer un rôle très important dans le *vol ramé* où elle est l'*agent principal de la remontée de l'aile.*

Ainsi, l'action de l'air contre les surfaces minces, inclinées sous différents angles, est très importante à connaître pour l'intelligence du mécanisme du vol ; mais c'est un point encore insuffisamment élucidé. La plupart des auteurs qui se sont occupés de la locomotion aérienne ont bien compris que de nouvelles expériences sur ce sujet sont encore nécessaires ; toutefois, la difficulté de les réaliser en a le plus souvent arrêté l'exécution[1].

J'ai, trop longuement peut-être, exposé les résultats obtenus par les physiciens, relativement à l'action de l'air sur diverses surfaces animées de différentes vitesses. L'essence des expériences de physique est de simplifier les conditions des problèmes et de s'éloigner, par conséquent, de l'extrême complexité des phénomènes de la Nature. Ces expériences, toutefois, n'ont pas été inutiles ; elles font comprendre le mécanisme de certaines manœuvres des oiseaux, permettent d'évaluer approximativement les forces qui agissent, et le travail dépensé dans

est descendu du haut d'une colline, dans la plaine, en glissant sur l'air ; sa trajectoire faisant avec l'horizon un angle d'environ 10°.

En somme, dit-il, les surfaces minces, convenablement inclinées, peuvent glisser, soutenues sur l'air, comme un chariot sur un plan incliné, soit qu'elles descendent sous l'action de la pesanteur, soit qu'elles se soutiennent ou s'élèvent sous l'influence d'une force impulsive.

1. Dans les bulletins de la *Société de navigation aérienne*, on trouve, en maints endroits, des projets d'expériences. Quelques-uns sont basés sur l'emploi du cerf-volant ; l'appareil serait livré sous des angles variables à l'action du vent, tandis qu'on mesurerait, au dynamomètre, l'effort de traction horizontale et la force soulevante.

D'autres auteurs ont proposé de faire des expériences en chemin de fer : on eût présenté au *vent de la vitesse* des plans minces, diversement inclinés, et l'on eût mesuré, comme ci-dessus, les valeurs des deux composantes. Enfin, plusieurs industriels ont généreusement offert de mettre au service de la science de puissantes souffleries dont ils disposaient, afin d'étudier, sur différentes surfaces et sous différents angles, l'action d'un vent régulier dont on ferait, à volonté, varier la vitesse.

certains genres de vol; elles sont un acheminement nécessaire vers des mesures plus précises, exécutées dans les conditions mêmes du vol des oiseaux.

§ **140. Applications prématurées du calcul au problème du vol.** — On vient de voir que les circonstances qui font varier la résistance de l'air sont extrêmement complexes : le moindre changement d'inclinaison de l'aile suffit pour faire changer beaucoup la force qui soutient l'oiseau, celle qui résiste à sa translation, et même le travail dépensé dans le vol, ainsi qu'on le verra plus loin. C'est donc à l'observation de la Nature, ou mieux, à l'expérimentation faite dans les conditions réelles du vol, qu'il faut revenir sans cesse pour comprendre la signification des différents actes de la locomotion aérienne.

Si les tentatives prématurées qui ont été faites pour calculer le travail dépensé dans le vol n'ont abouti qu'à des erreurs, cela tient surtout à ce que les calculs étaient basés sur des suppositions, et non sur des données expérimentales.

En substituant à l'observation impuissante les différentes méthodes basées sur l'emploi de la photographie instantanée, on arrivera sans doute à accumuler un grand nombre de renseignements précis sur les différents actes du vol. Les calculs pourront alors s'appuyer sur une base certaine ; mais il ne faut pas oublier que l'extrême variété des conditions anatomiques et physiologiques du vol exclut la possibilité d'en soumettre le mécanisme à une formule simple. Il faudrait, pour en définir les conditions, autant de formules qu'il y a de types variés de locomotion aérienne, c'est-à-dire une infinité.

Du reste, une théorie générale du vol des oiseaux n'a point à tenir compte de valeurs numériques, mais seulement à indiquer le sens dans lequel le phénomène est influencé par les différents facteurs qui interviennent dans sa production.

CHAPITRE XV

MÉCANISME DU COUP D'AILE

Première conception théorique du vol par Borellus. — Analogies du vol avec les autres genres de locomotion. — Égalité de l'action et de la réaction. — Moment de la résistance de l'air sur l'aile, et moment de la force du muscle grand pectoral; leur égalité. — Imitation mécanique d'un coup d'aile. — Détermination expérimentale du moment de la résistance de l'air. — Travail que produit le coup d'aile, en soulevant le poids de l'oiseau. — Partage de la force musculaire de l'oiseau entre la masse du corps et celle de l'air. — Influence de la force motrice sur la hauteur à laquelle l'oiseau est soulevé. — Influence de l'étendue de la surface des ailes sur la hauteur du soulèvement. — Rapidité excessive de l'abaissement de l'aile artificielle.

§ **141. Première conception théorique du vol par Borellus.** — Dans son remarquable Traité *De Motu Animalium* (1680), Borellus donne, pour la première fois, une théorie du vol des oiseaux. Voici en quels termes le fondateur de la *Mécanique animale* décrit l'action des ailes et les effets de la résistance de l'air.

« L'oiseau qui va prendre son vol commence par plier les jambes et fait un grand saut. En même temps, ses ailes se déploient suivant une ligne perpendiculaire à l'axe du corps. Elles forment alors deux lames, presque planes, qui s'abaissent en donnant un coup vigoureux dans une direction presque perpendiculaire à leur propre plan. Sous ce coup violent, l'air, malgré sa fluidité, résiste, tant par les effets de son *inertie naturelle* qui le tenait en repos, que par la force élastique de ses molécules comprimées qui s'oppose à la compression comme le ferait un corps dur. De là résulte un nouveau saut de tout le corps de l'oiseau; car le vol

n'est autre chose qu'une série de sauts fréquemment répétés dans l'air. »

« L'aile, pour sa relevée, se plie et fend l'air comme un tranchant, puis se déploie de nouveau, frappe en s'abaissant et ainsi de suite. »

Pour expliquer le double effet de l'impulsion que l'oiseau reçoit à chaque coup d'aile, et qui non seulement le soulève contre la pesanteur, mais le pousse en avant, Borellus compare l'action de l'aile à celle d'un *coin*. « En effet, dit-il, les pennes se relèvent légèrement en arrière. Il en résulte une obliquité de la surface percutante qui donne à la réaction de l'air sur le corps de l'oiseau une direction oblique en haut et en avant. »

Enfin, le même auteur explique le vol, ascendant ou descendant, par la rapidité plus ou moins grande du mouvement des ailes. « Si, dit-il, la vitesse de l'aile qui s'abaisse ne dépasse pas celle de l'air qui recule, l'oiseau reste en place ; si la vitesse de l'aile est plus grande que celle de l'air, l'oiseau s'élève en raison de la différence de ces deux vitesses ; si elle est moindre, l'oiseau descend [1]. »

Telle est l'essence de la théorie de Borellus ; on verra qu'elle renferme certaines erreurs, entre autres la conception du vol comme produit par des forces absolument intermittentes, ainsi que cela se passe dans une série de sauts. Mais les effets de l'inertie et de l'élasticité de l'air y sont nettement définis ; l'action de l'incidence oblique du plan de l'aile est entrevue.

Toutefois, lorsque Borellus cherche à estimer la force que l'oiseau déploie pour voler, il s'égare et arrive à des exagérations extrêmes : la force des pectoraux, croyait-il, était trois mille fois supérieure au poids du corps.

§ 142. Analogie du vol avec les autres genres de locomotion. — L'un des plus grands progrès réalisés par Borellus est sa conception générale de la locomotion des animaux ; conception qui rapproche, en les soumettant à des conditions communes, les

1. Cette théorie est restée classique jusqu'au commencement de ce siècle : Cuvier la reproduit à peu près textuellement.

modes de progression les plus disparates, tels que la marche, la reptation, la natation et le vol.

Pour rendre sa pensée plus claire, Borellus recourt à une comparaison : il représente les divers genres de locomotion par les différents procédés qu'emploie un batelier pour conduire sa barque.

Supposons, dit-il, un homme placé dans un bateau au milieu d'une eau tranquille; s'il veut progresser, il lui faut ce qu'on nomme un *point d'appui*. Admettons que le batelier soit muni d'une longue perche; il la plonge au fond de l'eau, jusqu'à ce qu'il rencontre le sol; faisant alors un effort de ses muscles, comme pour repousser le sol qui résiste, il obtiendra un déplacement du bateau en sens inverse de la poussée qu'il exerce. Ce genre de progression, avec le sol pris comme point d'appui, rappelle les conditions ordinaires de la locomotion des mammifères[1].

Si le batelier est muni d'une gaffe terminée par un crochet, il pourra prendre son point d'appui d'une façon tout autre. Accrochant les branches des arbres ou les aspérités du rivage, il tirera sur sa perche, comme pour amener à lui les corps auxquels elle est accrochée; si ces corps résistent à son effort, c'est le bateau qui se déplacera seul et s'avancera de leur côté. Ce mode de progression, par traction sur les points d'appui, représente les conditions qui se réalisent dans l'acte de grimper.

Mais si l'eau est trop profonde, si les bords sont trop éloignés pour qu'une gaffe s'y accroche, l'eau elle-même pourra fournir le point d'appui. Au moyen d'une rame aplatie, le batelier s'efforcera de chasser l'eau vers l'arrière de sa barque; cette eau n'obéira pas complètement à ses efforts et offrira une résistance d'inertie. Grâce à ce *point d'appui mobile*, le batelier imprimera à sa barque un mouvement de sens contraire à celui de

1. Le point important qui se dégage de la comparaison précédente, c'est que Borellus comprend bien que c'est la force musculaire du batelier qui est la cause du mouvement, et que le sol est inerte; tandis que les anciens entendaient, sous le nom de *réaction*, une force effective qui, émanant de la terre, agissait activement dans la locomotion.

l'eau. Tous les propulseurs hydrauliques offrent ce caractère commun, de repousser l'eau en arrière du bateau, afin d'imprimer à celui-ci un mouvement en avant.

Complétons la comparaison de Borellus : au lieu d'une rame agissant sur l'eau, on peut supposer le batelier muni d'une large palette avec laquelle il repoussera l'air en arrière ; le point d'appui qu'il trouvera de la sorte, sur un fluide encore plus mobile que l'eau, permettra à sa force musculaire de s'appliquer utilement à la propulsion de sa barque. Cette conception du point d'appui mobile est la clé du mécanisme du vol.

§ 143. Egalité de l'action et de la réaction. — Un axiome qui domine toute la mécanique, c'est que *l'action est égale à la réaction;* il implique l'égalité entre la force qui agit sur le corps de l'oiseau et la résistance aux mouvements de l'air.

Or, nous connaissons les deux composantes de la force qui agit sur l'oiseau (§ 139) ; nous en pouvons donc déterminer l'intensité et la direction. En effet, on sait que, dans le vol horizontal, la composante verticale qui soutient l'oiseau a une valeur moyenne égale au poids du corps : pour notre Goéland, elle vaut 623 grammes, tandis que la composante horizontale qui le propulse a une valeur incessamment variable, mais dont le maximum serait de 1 916 grammes, d'après mes mesures, et serait encore plus élevé d'après celle de Labouret. En construisant le parallélogramme des forces, on obtient, pour valeur totale de la force qui agit sur l'oiseau, 2 020 grammes environ, au moment de son maximum d'intensité. Quant à la direction de cette force, on trouve qu'elle est inclinée d'environ 20 degrés au-dessus de l'horizon.

On doit donc conclure que, si le coup d'aile produit un courant d'air, ce courant sera dirigé en bas et en arrière, formant avec l'horizon un angle de 20 degrés[1].

1. Cette orientation doit, du reste, changer à chaque instant, car la composante horizontale qui propulse l'oiseau changeant de valeur aux différentes phases du coup d'aile, la diagonale du parallélogramme change elle-même de valeur et de direction.

§ 144. **Moment de la résistance de l'air sur l'aile, et moment de la force du muscle grand pectoral; leur égalité.** — Si l'action des muscles de l'aile s'exerçait directement contre la résistance de l'air, on serait conduit à admettre que les grands pectoraux, au moment de leur effort maximum, développent précisément une force de 2 020 grammes. Mais c'est par l'intermédiaire de leviers osseux que la puissance des muscles et la résistance de l'air s'opposent l'une à l'autre. Dans ces conditions, c'est entre les *moments* des deux forces opposées qu'existe l'égalité, autrement dit, entre les produits de chacune de ces forces par le bras de levier sur lequel elle agit.

Or le calcul § 137 permet de déterminer en quel point de l'aile de l'oiseau s'applique la résistance totale de l'air dont nous connaissons la valeur; d'autre part, la dissection du Goéland montrera en quel point de l'humérus s'applique la force musculaire. Ces deux points étant déterminés, la distance dont chacun d'eux est séparé de l'axe du mouvement de l'aile représentera la longueur du bras de levier de chacune des deux forces. Dès lors, l'égalité du moment de la résistance de l'air et de celui de la force musculaire se représentera par la formule suivante :

$$R \times L = F \times l$$

dans laquelle R représente la résistance de l'air, F la force musculaire, L et l les longueurs des bras de leviers de ces deux forces. Cette détermination donnera, pour l'effort maximum du muscle grand pectoral, une valeur qui permettra de contrôler l'exactitude de celle qui a été obtenue par les mesures dynamométriques (§ 63).

On a vu que le point d'application de la résistance de l'air se fait sensiblement aux 2/3 de la longueur de l'aile, comptés à partir du centre de mouvement de l'épaule (§ 137). Sur le Goéland que nous prenons pour type, cela donnait au bras de levier de la résistance de l'air une longueur de $0^{m},30$. Le moment de cette résistance serait donc $2^{kil},020 \times 0^{m},30$.

D'autre part, en disséquant l'aile du Goéland pour déterminer le point d'attache du grand pectoral, on trouve que ce point est éloigné de l'articulation de l'épaule d'environ $0^{m},017$. C'est par ce bras de levier qu'on multiplie la force musculaire pour avoir son moment d'action, lequel, avons-nous dit, est égal à celui de la résistance de l'air. Cette égalité nous permettra de calculer d'une manière suffisamment approchée la valeur de la force musculaire de l'oiseau.

En effet, en égalant le moment de la puissance à celui de la résistance, on aura :

$$F \times 0,017 = R \times 0^{m},30$$

d'où

$$F = 35^{kil},647.$$

Mais F représente la force réunie des deux muscles pectoraux, de même que R représentait la somme des résistances de l'air sous les deux ailes. Un seul muscle pectoral aura donc pour force à l'instant de son effort maximum

$$\frac{35^{kil},647}{2} \quad \text{ou} \quad 17^{kil},823$$ [1]

1. Quand on cherche, sur l'aile d'un oiseau, la position du point d'application de la force musculaire, on trouve que le grand pectoral s'insère à l'humérus par un tendon aplati qui s'étale sur une assez grande longueur (1 centimètre et demi sur le Goéland). Sur ce large tendon, convergent toutes les fibres du muscle, plus nombreuses à la partie moyenne qu'aux deux extrémités de l'insertion du tendon. Afin de localiser en un point l'application des efforts individuels de tous les faisceaux du grand pectoral, j'ai pratiqué une coupe du tendon, et considéré le centre de gravité de la surface ainsi obtenue, comme le point d'application de la force musculaire. Enfin, pour déterminer la position du centre de mouvement de l'épaule, j'ai pris, suivant l'usage, le centre de courbure de la tête humérale. La distance qui sépare ce centre du point d'insertion du muscle était environ de $0^{m},017$.

Cette valeur, qui correspond à l'effort maximum développé par les muscles de l'oiseau, s'accorde assez bien avec celles qu'ont données les expériences dynamométriques faites sur d'autres espèces, la Buse et le Pigeon (§ 63). Enfin, comme la section des grands pectoraux du Goéland était de 12 centimètres carrés, la force spécifique des muscles de cet oiseau aurait été de $1^{k}500$ grammes (§ 64).

§ **145. Imitation mécanique d'un coup d'aile.** — Les calculs précédents ne peuvent guère donner qu'une valeur approchée des forces et des résistances qui sont en jeu dans un coup d'aile. J'ai voulu en contrôler les résultats par une autre méthode qui m'a souvent réussi dans des cas analogues, la méthode synthétique, c'est-à-dire la reproduction artificielle de l'acte mécanique en question [1].

Pour imiter le coup d'aile d'un oiseau, dans des conditions faciles à analyser, il fallait remplacer les ailes véritables par des surfaces minces, d'une forme bien déterminée géométriquement; les faire abaisser brusquement, par la détente d'un ressort de force connue; enfin, mesurer l'effort de soulèvement exercé par la résistance de l'air au moment de l'abaissement de ces ailes[2].

1. Voir (Marey, *La circulation du sang*. Paris, 1881) la reproduction artificielle du pouls et de la pulsation du cœur avec leurs caractères normaux ou pathologiques.

2. L'appareil fut construit de la façon suivante. Un bâti léger, en forme d'Y (fig. 126), fut établi sur un socle creux M, dans lequel on pouvait intro-

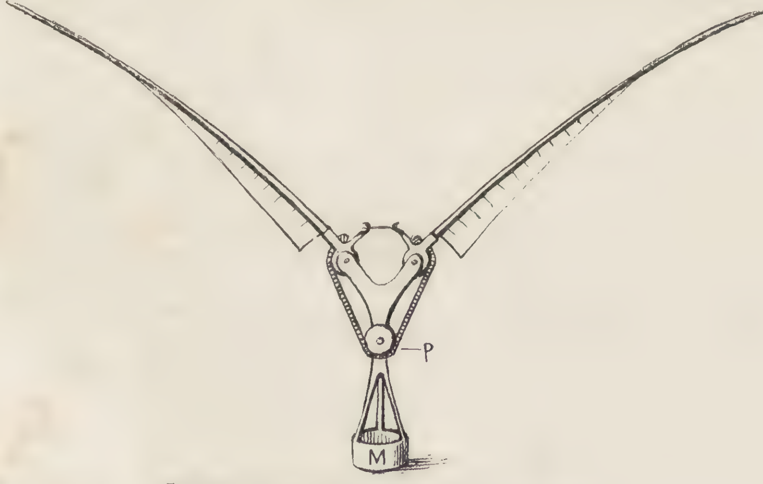


Fig. 126. — Appareil imitant le coup d'aile de l'oiseau.

duire une certaine quantité de grenaille de plomb. Cette partie de l'appareil représente le corps de l'oiseau et son poids qu'on peut faire varier à volonté.

Au bout des deux branches de l'Y, sont articulées à charnières deux longues tiges, amincies à leurs extrémités, et sur lesquelles s'implantent

§ 146. Détermination expérimentale du moment de la résistance de l'air. — Nous venons de voir que l'appareil imitant le battement d'aile de l'oiseau saute en l'air à chaque coup d'aile; chargeons-le graduellement de grenaille de plomb; à un moment donné, il ne se détachera plus de la table. Il est clair qu'à ce moment la résistance de l'air, pendant l'abaissement des ailes, ne fait plus que soutenir le poids de la machine. Nous venons de réaliser les conditions du coup d'aile de l'oiseau dans le vol horizontal, où l'aile, en s'abaissant, trouve sur l'air une pression égale au poids du corps qu'elle soutient à une hauteur constante. Dans ces conditions, le moment de la résistance de l'air est égal à celui de la force du ressort. Si donc nous connaissions le lieu d'application de la résistance totale de l'air sous chacune des ailes, en appliquant sur ce point un effort égal, pour chaque aile, à la moitié du poids du corps, nous ferions équilibre au moment de la force du muscle artificiel et, en même temps, nous soutiendrions le poids de l'oiseau mécanique porté sur ses ailes étendues.

Or, on peut chercher, par tâtonnements, ce point d'application de la force qui correspond à la résistance de l'air. Quand on l'aura trouvé, on le reconnaîtra à ce signe, qu'une pression agis-

des nervures d'acier soutenant un voile d'étoffe mince ou de papier. Ce sont des ailes, légères et flexibles, pouvant décrire un mouvement angulaire autour de l'articulation de l'épaule. La forme de leur surface est sensiblement parabolique. La base des ailes donne attache à un ressort de caoutchouc fortement tendu qui se réfléchit en bas sur une poulie *p*. Ce ressort représente les muscles pectoraux; la poulie sur laquelle il se réfléchit sert à partager également l'effort de la tension entre les deux ailes.

A la face dorsale des ailes, et près de leurs bases, sont deux crochets qui s'approchent l'un de l'autre, quand on soulève les ailes en tendant le ressort. Un anneau de fil jeté sur ces crochets les réunit, en tenant les ailes relevées et les ressorts tendus. Qu'on brûle ce fil, aussitôt les ailes s'abattent par la détente du ressort, et atteignent rapidement une vitesse uniforme qu'elles conservent encore après avoir dépassé la position horizontale. Si la machine n'est pas trop chargée de grenaille de plomb, elle saute à une certaine hauteur, par la réaction de la résistance de l'air sous les ailes. Le fonctionnement de cette petite machine est très propre à éclairer les conditions dynamiques du coup d'aile.

sant de bas en haut en ce point fera justement équilibre à la force du ressort et au poids de la machine.

Un seul point, sous chaque aile, satisfait à ces conditions ; il est situé aux 2/3 de la longueur de l'aile comptés à partir de l'articulation de l'épaule.

La figure théorique 127 montre l'appareil en équilibre, les ailes étendues et soulevées par deux forces *rr'* appliquées aux deux

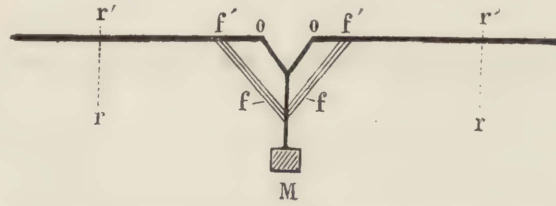


Fig. 127. — Représentation théorique des moments de la puissance et de la résistance dans l'appareil mécanique imitant le coup d'aile de l'oiseau. *of*, bras de levier du ressort *ff'* ; *or*, bras de levier de la résistance de l'air.

tiers de l'aile comptés à partir du point O. Les ressorts *ff'* sont tendus, et leur force fait précisément équilibre au poids du corps M qui est ainsi exactement soutenu.

Cette expérience confirme donc ce que nous avons vu plus haut sur la position du centre d'action de l'air sous une aile de forme à peu près triangulaire[1].

§ 147. Du travail que produit le coup d'aile, en soulevant le

1. On peut s'assurer expérimentalement que si l'abaissement des ailes fait exactement équilibre au poids de l'oiseau, toute pression appliquée sous les ailes, en dehors ou en dedans du point *r*, a un bras de levier trop long ou trop court pour équilibrer la force du ressort.

Réciproquement, quelle que soit la force du ressort et son rapport avec le poids de la machine, on peut toujours prévoir si elle se soulèvera ou non par l'abaissement de ses ailes. Il suffit pour cela de chercher, par tâtonnements, en quels points de la face inférieure des ailes doivent être appliquées les pressions, pour qu'elles équilibrent exactement la force du ressort moteur. Ces points sont-ils en dedans de *r'*, le ressort est trop faible et la machine ne sera pas soulevée ; sont-ils en *r'*, la machine sera exactement soutenue; enfin sont-ils en dehors de *r'*, le ressort est trop fort et fera sauter la machine d'autant plus haut que les pressions qui l'équilibrent doivent être appliquées plus près de l'extrémité de l'aile.

Un expérimentateur très habile, V. Tatin, a réussi à créer sur ce prin-

poids de l'oiseau. — L'appareil qui vient d'être décrit permet, au moyen de quelques modifications représentées par la figure 128, de mesurer les effets mécaniques du coup d'aile, dans toutes sortes de conditions[1] : soit qu'on augmente la force du ressort qui produit l'abaissement des ailes, soit qu'on change le poids à

cipe un petit appareil volant qui parcourt un espace de 20 mètres environ, en donnant des coups d'ailes analogues à ceux de l'oiseau.

Toutefois, Tatin n'a réussi à obtenir le vol horizontal, c'est-à-dire avec compensation totale des effets de la pesanteur, qu'en donnant à son ressort une force plus grande que celle que j'ai trouvée nécessaire. Pour que son appareil se soutînt dans l'air, il fallait que le ressort fût tellement tendu, que pour l'équilibrer, les pressions sous les ailes s'appliquassent près de leurs extrémités (voir Tatin, *Expériences sur le vol mécanique*. Travaux du Laboratoire de M. Marey, 1876, p. 87). Je pense que cette différence tient aux résistances passives qui, dans l'appareil de Tatin, consommaient une partie de la force du ressort moteur.

1. Pour déterminer rigoureusement les variations de hauteur des sauts, j'ai recouru à la méthode graphique, en modifiant ainsi la construction de l'appareil.

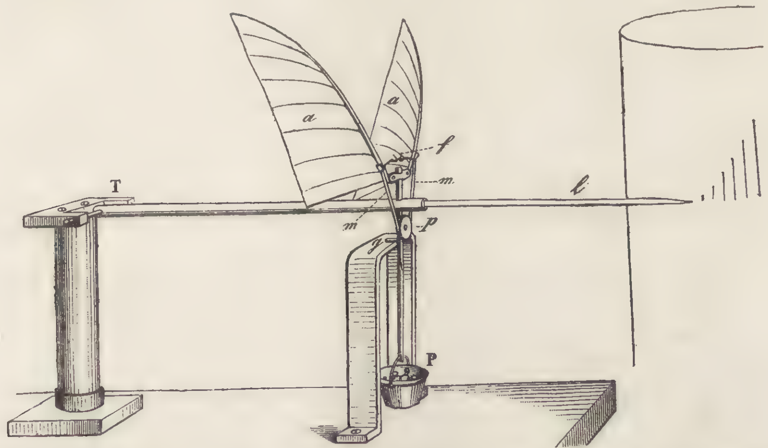


Fig. 128. — Appareil inscripteur des réactions verticales du coup d'aile et de leurs variations suivant le poids à soulever et suivant la force du ressort moteur.

La figure 128 montre l'oiseau artificiel, monté sur une longue tige T*l* de bois léger T*l*, articulée par une charnière en haut d'une colonne; de cette façon la machine sautera dans un plan parfaitement vertical. La tige se continue en avant de l'oiseau, et se termine par une plume, pour tracer sur un cylindre enfumé les hauteurs de soulèvement. Une goupille *g* repose sur un arc de fer et soutient la machine à une hauteur constante

soulever, la surface des ailes, etc. On peut, de cette manière, se rendre compte des conséquences mécaniques des différentes conformations de l'oiseau décrites au chapitre V.

§ 148. L'expérience montre que, pour une même force du ressort, si l'on augmente régulièrement le poids à soulever, la hauteur du soulèvement diminue, mais ne suit pas, en sens inverse, la variation du poids. — La figure 129 représente la courbe de ces variations ; les ordonnées correspondent aux hauteurs du soulèvement, les abscisses aux variations du poids à soulever.



Fig. 129. — Hauteurs auxquelles le coup d'aile soulève l'appareil sous des charges graduellement croissantes de 95 à 175 grammes.

Mais si l'on multiplie le poids soulevé, dans chaque expérience, par la hauteur du soulèvement, le produit décroît d'une manière régulière et sa valeur est inversement proportionnelle à celle du poids soulevé. Or, le produit d'un poids par la hauteur à laquelle il est élevé n'est autre chose qu'un *travail*. On doit donc conclure que la réaction d'un même coup d'aile, c'est-à-dire la détente d'un même ressort, ou *la même dépense de travail moteur transmet, à la masse de la machine, une quantité de travail d'autant moindre, que cette masse est plus grande*. Or, comme il ne peut pas y avoir de travail perdu, il faut que la masse de l'air ait reçu plus de travail quand celle de l'oi-

qui représente les *minima* à partir desquels les sauts s'élèveront plus ou moins haut, suivant la force du ressort *mm* par rapport au poids soulevé.

Enfin, une précaution indispensable pour que les ailes *aa* soient toujours également élevées, et les ressorts également tendus, dans chaque expérience, consiste à fabriquer à l'aide d'un mandrin de bois les anneaux en fil *f* qui relieront les ailes et tiendront l'appareil tendu, jusqu'à ce qu'on les brûle. On obtient ainsi des anneaux semblables entre eux; les ailes sont toujours également élevées, et les ressorts tendus au même degré.

seau en a reçu moins. Cela conduit à examiner comment se partage le travail d'une force entre deux masses inégales.

§ 149. **Du partage de la force musculaire de l'oiseau entre la masse du corps et celle de l'air déplacé.** — La balistique résout un problème du même genre, quand elle calcule la manière dont se partage la force de la poudre entre la masse d'un canon et celle du projectile. Elle nous apprend que la grande et la petite masse reçoivent toutes deux la même *quantité de mouvement :* c'est en cela que l'action est égale à la réaction, mais le *travail* communiqué à la pièce, c'est-à-dire à la grande masse, est très faible, en comparaison de celui qui est communiqué à la masse beaucoup plus petite du boulet[1]. En effet, la formule du travail reçu par une masse en mouvement est $\frac{mv^2}{2}$; ce travail sera donc proportionnel au carré de la vitesse dont chacune des masses est animée, et si le boulet pèse 300 fois moins que la pièce de canon, il aura reçu 300 fois plus de travail qu'elle.

Dans le cas du vol, plus la masse de l'oiseau sera grande

1. Voici la solution de ce problème donnée par Poncelet (*Introduction à la mécanique industrielle*, p. 174).

Soit F, à un instant donné, la force motrice qui pousse en avant le boulet et qui est censée pousser en sens contraire, et avec une intensité égale, le fond de l'âme de la pièce; soient P et P′ les poids du boulet et de la pièce y compris son affût, etc. ; soient V et V′ respectivement les petits degrés de vitesse qui leur sont imprimés à un instant quelconque et dans la durée de l'élément de temps t, on aura la proportion

$$F : P :: V : gt \quad \text{ou} \quad PV = F \times gt.$$

On aura de même, pour la pièce et son affût :

$$F : P' :: V' : gt \quad \text{ou} \quad P'V' = F \times gt.$$

Ainsi :

$$PV = P'V' \quad \text{ou} \quad V : V' :: P' : P.$$

Par conséquent, les degrés de vitesse imprimés au boulet et à la pièce, dans un temps infiniment petit, sont réciproquement proportionnels aux poids de ce boulet et de cette pièce.

De même, les vitesses finies, imprimées à la pièce et au boulet, à l'instant où celui-ci a acquis tout son mouvement, sont réciproquement entre elles comme le poids de cette pièce est au boulet.

par rapport à celle de l'air mis en mouvement, plus sera faible la quantité du travail moteur de l'aile qui s'appliquera à la masse du corps, et plus sera grande la part qui s'appliquera au déplacement de l'air.

§ 150. Influence de la force motrice sur la hauteur à laquelle l'oiseau est soulevé. — L'appareil représenté (fig. 128) m'a encore servi à rechercher ce qui se passe, quand on fait varier la force

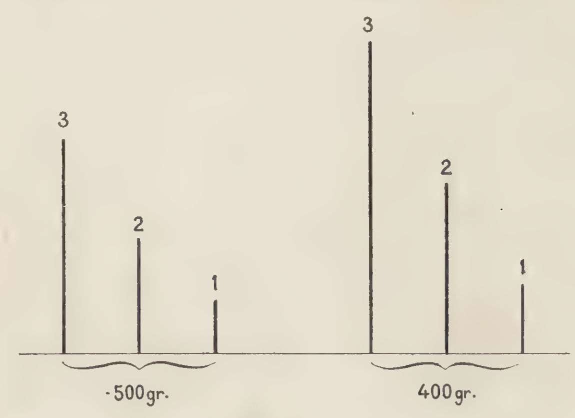


Fig. 130. — Différences de hauteur auxquelles est soulevé l'appareil, suivant son poids et suivant la force du ressort moteur. Dans chacune des deux séries, la force décroît comme les nombres 3, 2, 1.

du ressort moteur. Le but des expériences était de savoir comment se comporteraient des oiseaux de même poids, mais pourvus de muscles d'inégale puissance.

La figure 130 montre qu'à poids égal de la machine, la hauteur du soulèvement croît plus vite que la force du ressort[1]. En effet, tandis que la force du ressort moteur croissait à peu près suivant une progression arithmétique, la hauteur du soulèvement croissait plus rapidement.

1. Voici comment on faisait varier la force du ressort moteur. Un tube de caoutchouc bien homogène développe toujours la même traction quand on en prend un tronçon d'une longueur donnée, et qu'on le soumet à la même élongation ; je prenais donc 3 morceaux de ces tubes semblables en longueur et, dans mes expériences successives, j'employais d'abord un seul de ces ressorts, puis deux à la fois, puis trois, pour produire l'abaissement des ailes de la machine. Chacun des ressorts développait un effort statique de 900 grammes.

§ 151. **Influence de l'étendue de la surface des ailes sur la hauteur de soulèvement de l'oiseau.** — Une première série d'expériences fut faite avec des ailes dont la surface totale était de 700 centimètres carrés, le ressort moteur étant constant, et les charges graduellement croissantes. J'obtins (fig. 131) la série des ordonnées représentées par des lignes pleines. J'accrus alors la surface des ailes, et la portai à 1 092 centimètres carrés. Les hau-

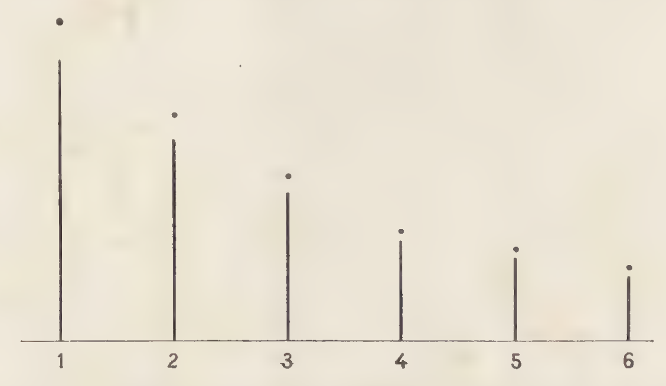


Fig. 131. — Effet des changements de la surface de l'aile sur la hauteur du soulèvement. Les points expriment les hauteurs de soulèvement avec une grande surface d'aile et des poids croissants. Les lignes pleines expriment les hauteurs de soulèvement avec les mêmes poids croissants, mais avec une surface d'ailes d'une fois et demie moindre.

teurs des nouveaux soulèvements sont représentées par des points qui en marquent les sommets.

On voit que l'accroissement de la surface des ailes n'amène pas un accroissement proportionnel dans la hauteur à laquelle se soulève la machine. En outre, la différence de hauteur du soulèvement obtenu avec des surfaces d'ailes inégalement étendues diminue graduellement, à mesure que le poids de l'appareil augmente; elle était sensiblement nulle, dès la septième expérience.

On conçoit que la diminution de la surface des ailes soit compensée par un accroissement de la rapidité de leur abaissement, et qu'un oiseau dont on a rogné les rémiges puisse voler encore, en frappant l'air avec plus de rapidité[1].

1. La résistance d'inertie des ailes intervient pour fournir un point d'ap-

§ 152. **Rapidité excessive de l'abaissement de l'aile artificielle.** — L'appareil artificiel imite les effets du coup d'aile d'un oiseau véritable, sauf sur un point : c'est que le coup de l'aile artificielle est d'une extrême rapidité, en comparaison du coup d'aile de l'oiseau (§ 70).

On dirait, si la supposition ne paraissait absurde, que l'air résiste moins à l'aile factice qu'à l'aile véritable. Cette absurdité n'est qu'apparente ; on verra, au chapitre prochain, comment et pourquoi l'oiseau trouve sur l'air bien plus de résistance que n'en trouvait le petit appareil qui vient d'être décrit.

pui aux muscles, quand la surface est trop réduite pour trouver un appui sur l'air. Ainsi, avec des ailes massives, j'ai obtenu un notable soulèvement de la machine, même quand toute la surface membraneuse avait été enlevée. Il va sans dire qu'un tel soulèvement était bientôt suivi d'une violente réaction inverse.

CHAPITRE XVI

RÉSISTANCE ET MOUVEMENTS DE L'AIR PENDANT L'ABAISSEMENT DE L'AILE

Le coup d'aile trouve sur l'air plus de résistance, quand l'oiseau est animé d'une vitesse de translation horizontale. — Expériences sur un oiseau artificiel, animé d'une translation circulaire. — Expériences sur un oiseau artificiel, animé d'une translation rectiligne. — Plusieurs auteurs ont indiqué l'influence de la translation de l'oiseau sur la résistance que son aile trouve dans l'air. — Interprétation de l'accroissement de la résistance de l'air, pendant la translation de l'oiseau, par la direction oblique de l'aile sur sa trajectoire. — Déplacement de l'air par le coup d'aile. — Automatisme du mouvement par lequel l'aile qui s'abaisse se porte en avant. — Angle que le plan des rémiges forme avec l'horizon, dans le coup d'aile.

§ 153. **Le coup d'aile trouve sur l'air plus de résistance quand l'oiseau est animé d'une vitesse de translation horizontale.** — Quand une Mouette s'envole de la surface de la mer, elle donne d'abord de grands coups d'ailes dont l'amplitude est au moins de 100° ou 110°; puis, à mesure que l'oiseau prend de la vitesse, ses battements diminuent d'étendue et l'angle d'oscillation des ailes tombe à 30° ou 40°. Souvent l'oiseau vole ainsi, pendant longtemps, en rasant l'eau, sans gagner ni perdre de hauteur et en conservant une régularité parfaite dans la fréquence des battements de ses ailes.

Puisque l'oiseau ne perd pas de hauteur quand ses coups d'ailes diminuent d'amplitude, il faut bien que les battements de faible étendue soient aussi efficaces, pour le soutenir, que les grands coups d'ailes de l'essor.

Or, la seule différence entre les conditions du vol, au moment

de l'essor et dans les instants qui suivent, c'est que, partant de l'immobilité, l'oiseau gagne une vitesse de translation horizontale graduellement croissante; la vitesse horizontale lui fournirait donc un point d'appui plus solide sur l'air. L'expérience suivante confirme cette supposition.

Si l'on attache un Goéland par les pattes, au bout d'une longue ficelle qu'on laisse se dérouler, l'oiseau vole comme s'il était libre. Mais dès que la corde, arrivée à fin de course, arrête la translation horizontale de l'oiseau, celui-ci tombe lourdement, incapable de se soutenir dans l'air, malgré les battements de ses ailes. Ce phénomène est, en quelque sorte, la contre-partie de ce qui se passe au moment de l'essor, quand la vitesse du vol s'accroît.

L'explication de ce fait me parut être la suivante. L'air résiste, par son inertie, au moment où une force extérieure, l'abaissement de l'aile par exemple, tend à lui imprimer une accélération; mais dès qu'il a reçu cette nouvelle vitesse, il résiste beaucoup moins. Ainsi, quand l'oiseau bat des ailes sur place, il frappe une colonne d'air qui résiste d'abord, puis se dérobe sous les ailes; mais si l'oiseau est animé d'une vitesse horizontale, ses ailes frappent *successivement* une série de colonnes d'air différentes et trouvent, sur chacune d'elles, la résistance initiale d'inertie[1].

Pour vérifier cette théorie j'entrepris une série d'expériences qui confirmèrent pleinement mes prévisions.

§ 154. **Expériences sur un oiseau artificiel, animé d'une translation circulaire.** — La figure 132 représente un appareil essentiellement formé d'une pompe à air qui actionne deux ailes artificielles. Cet appareil fut établi sur un bras du manège précédemment décrit. Une petite machine à vapeur en-

1. Toutes les espèces d'oiseaux ne tombent pas ainsi quand on supprime leur vitesse de translation : les Moineaux, les Pigeons et en général les *oiseaux capables de voler en s'élevant verticalement* ne sont pas précipités à terre quand la corde est tendue; ils changent seulement la direction de leur vol et, le plus souvent, reviennent en arrière.

voyait, par un tube longeant le bras du manège et traversant son axe, une soufflerie qui actionnait la pompe et faisait battre les ailes avec une force constante, à des intervalles de temps égaux[1].

Tant que l'appareil battait des ailes sur place, les mouvements avaient une grande amplitude; mais si le manège tournait,

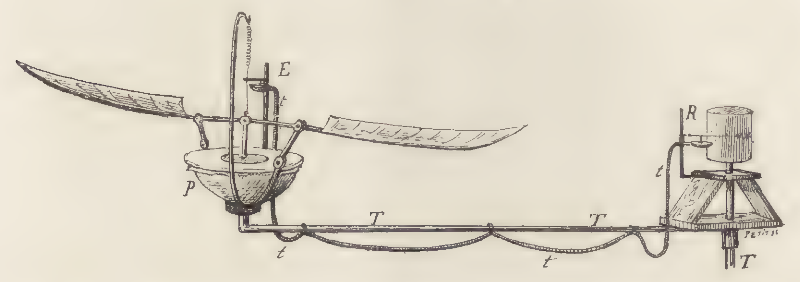


Fig. 132. — Disposition de l'oiseau mécanique battant des ailes avec une translation circulaire.

l'amplitude des coups d'ailes diminuait singulièrement et tombait de 60° à 20° et même moins.

Le tracé (fig. 133) montre cette décroisance de l'amplitude des coups d'ailes, sous l'influence de la translation.

§ 155. **Expériences sur un oiseau artificiel animé d'une translation rectiligne.** — Craignant que le mouvement rotatif du manège n'ait amené quelque changement dans les conditions de la résistance de l'air, je fis de nouvelles expériences sur un oiseau mécanique animé d'une translation rectiligne.

L'appareil qui me servit ressemblait à celui qui a été décrit plus haut (§ 146) et qui ne donne qu'un coup d'abaissement de ses ailes par la détente d'un ressort; de cette façon, une même force

1. Un système de tambours à air transmettait et inscrivait les élévations et abaissements des ailes, sur un cylindre immobile au-dessus de l'axe du manège. Au-dessous du levier inscripteur, un diapason vibrant traçait les centièmes de seconde, tandis que le levier inscripteur du mouvement des ailes et le style du chronographe étaient entraînés par la rotation du manège. De sorte que la largeur occupée sur le tracé par une oscillation des ailes était d'autant plus grande, que la rotation du manège était elle-même plus rapide.

motrice agissait, chaque fois, pour abaisser les ailes. On devait obtenir un abaissement d'autant plus lent que la résistance de l'air serait plus grande. C'est ce qui se produisit en effet. L'appareil fut monté, au moyen de poulies, sur un fil de fer horizontalement tendu, le long duquel il pouvait glisser plus ou moins vite, quand on le tirait au moyen d'une corde enroulée sur un tambour.



Fig. 133. — Décroissement de l'amplitude du coup d'aile d'un oiseau mécanique, sous l'influence d'une translation circulaire de l'appareil.

Quand l'appareil était immobile, son coup d'aile durait à peine 1/3 de seconde. Si on l'entraînait avec une vitesse de 3 mètres, le coup d'aile durait les $^2/_3$ d'une seconde. Avec une vitesse de $5^m,50$ l'abaissement de l'aile durait une seconde entière[1].

1. La disposition de l'oiseau a été sommairement imitée (fig. 134); chacune de ses ailes *a* était réduite à un plan mince et rigide ayant $0^m,50$ de long sur $0^m,10$ de large. Ces deux ailes, solidaires l'une de l'autre, s'abaissaient, à un moment donné, sous l'influence de la détente d'un ressort. Un travail constant était ainsi dépensé, à chaque coup d'aile.

La translation de la machine se faisait par roulement sur un fil de fer *ff* horizontalement tendu. Pour cela, deux grandes poulies R R furent placées aux deux extrémités de la salle; elles portaient dans leur gorge un câble sans fin C, dont l'un des brins était parallèle au fil de fer qui servait de rail à l'appareil. Quand on faisait tourner l'une des poulies au moyen d'une manivelle, ce brin qu'on avait fixé à la machine-oiseau en-

Je n'ai pu imprimer à l'oiseau mécanique une vitesse supérieure à 6 mètres à la seconde, mais les expériences dont on

traînait celle-ci, plus ou moins rapidement, le long du fil de fer. Il s'agissait de mesurer avec précision, d'une part cette vitesse, de l'autre la durée de l'abaissement de l'aile. Ces mesures ont été obtenues graphiquement, au moyen de la disposition suivante.

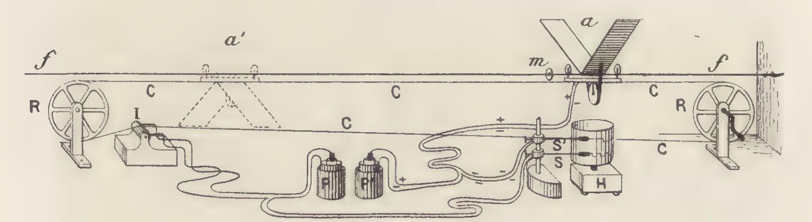


Fig. 134. — Disposition de l'expérience destinée à mesurer les durées du coup d'aile pendant une translation rectiligne plus ou moins rapide.

a. *Mesure de la vitesse de translation de la machine.* — Cette vitesse n'est autre que celle de la corde sans fin qui produit l'entraînement. Or, cette corde s'enroule sur une petite poulie I dont les tours sont comptés et inscrits sur un cylindre tournant, au moyen d'un style électrique S fonctionnant à peu près comme le télégraphe Morse.

La poulie qui sert au comptage de la vitesse a exactement $0^m,40$ de circonférence ; elle porte, sur la moitié de son périmètre, une armature métallique qui ferme un courant de pile, lorsque deux frotteurs passent au-dessus d'elle, ce qui arrive pendant la moitié de chacun des tours de la poulie. Le style inscripteur, mis en mouvement par un électro-aimant, trace une ligne crénelée qui, à chacun de ses changements de direction, indique que $0^m,20$ de câble ont défilé, c'est-à-dire que l'oiseau mécanique a parcouru cet espace. Ainsi, plus la translation imprimée à l'oiseau est rapide, plus est grand le nombre des sinuosités inscrites, en un temps donné, sur un cylindre dont la rotation est uniforme.

b. *Mesure de la durée d'abaissement des ailes.* — Un second signal électrique S', semblable à celui qui compte les tours de poulies, sert à déterminer la durée de l'abaissement des ailes. L'oiseau est construit de telle sorte qu'au moment où ses ailes commencent à s'abaisser, le courant qui traverse ce signal est rompu ; ce même courant se referme quand les ailes sont arrivées à la fin de leur course. Il s'ensuit que la déviation du style mesure, par sa longueur dans le tracé, la durée de l'abaissement de l'aile.

Dans une série d'expériences, on inscrivit à la fois la vitesse de l'oiseau mécanique et la durée de l'abaissement de ses ailes ; cela donna une série de tracés (fig. 135) dont voici l'interprétation.

Expérience I. — La ligne supérieure *a* indique la durée de l'abaissement

vient de lire les résultats suffisent pour rendre évidents les effets de la translation sur la résistance de l'air qu'elle augmente.

des ailes; en portant cette longueur sur l'échelle du temps, on voit que l'abaissement de l'aile dure 1/3 de seconde. Dans cette expérience, il n'y avait pas translation de l'oiseau : la ligne b, tracée par le signal des vitesses ne présente, en effet, aucune inflexion.

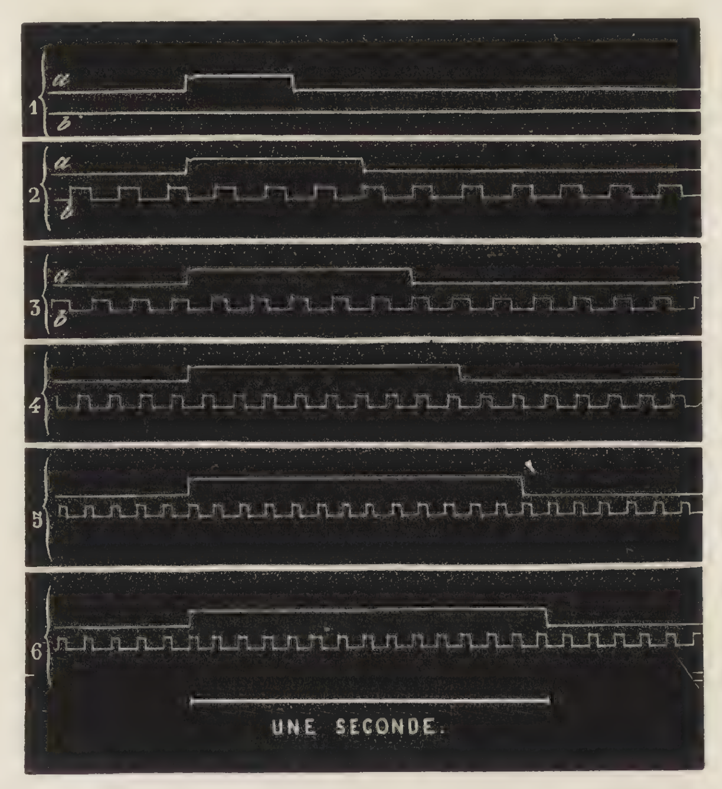


Fig. 135. — Variations de la durée d'un coup d'aile, suivant la vitesse de translation de l'appareil.

Expérience II. — La durée de l'abaissement des ailes (ligne a) est déjà plus grande; elle excède une demi-seconde. La translation est alors de 3 mètres par seconde; pour déterminer cette vitesse, on prend au compas, sur la ligne b, la longueur qui correspond à cinq changements de direction de la courbe, ce qui représente un parcours de cinq fois $0^{m},20$ ou d'un mètre; on porte ensuite cette longueur sur l'échelle des temps et l'on constate que, dans une seconde, elle est contenue environ trois fois : le parcours, en une seconde, est donc de 3 mètres. Cette deuxième expérience montre

On comprend, d'après cela, pourquoi le coup d'abaissement était si bref dans l'oiseau mécanique battant des ailes sur place (§ 145), tandis que les véritables oiseaux ont des battements beaucoup plus lents[1].

On s'explique également pourquoi l'oiseau attaché par un fil tombe, malgré ses coups d'ailes, aussitôt que la tension du fil vient arrêter sa translation horizontale.

Reportons-nous à l'expérience décrite § 61 où un Pigeon, attelé au bras d'un manège, ralentissait les battements de ses ailes, quand on imprimait à ce manège un rapide mouvement de rotation. C'est à l'augmentation de la résistance de l'air qu'on doit attribuer cet effet.

Enfin, si un oiseau qui s'envole de terre s'oriente toujours le bec

déjà une augmentation de durée de l'abaissement des ailes, sous l'influence d'une translation modérée de l'oiseau.

Expériences III, IV, V et VI. — Dans ces autres expériences, en procédant toujours de la même manière, pour la détermination des durées du coup d'aile et des vitesses de translation, on trouve que la durée d'abaissement s'accroît toujours quand la vitesse de translation augmente : ainsi, avec une vitesse de $5^m,50$ l'abaissement des ailes dure environ une seconde.

Il ne m'a pas été possible de trouver un rapport défini entre la vitesse de translation et la durée de l'abaissement des ailes. Des expériences faites dans des conditions identiques en apparence ont présenté parfois de légers écarts entre elles. Cela tient à ce que la moindre oscillation du fil de fer qui sert de rail à la machine suffit pour modifier l'espace parcouru par l'aile descendante.

1. Dans les deux sortes d'expériences qui viennent d'être relatées, il y a une différence apparente entre les résultats obtenus: l'oiseau à mouvement circulaire avait les battements d'aile moins amples, mais de fréquence constante; l'oiseau à mouvement rectiligne avait les coups d'ailes plus lents, mais d'étendue constante.

Cette différence apparente s'explique d'elle-même par les conditions différentes des deux expériences: dans l'une, les coups d'ailes étaient multiples et la fréquence en était réglée par l'action d'une pompe à vapeur; dans l'autre, il n'y avait qu'un seul coup d'aile, produit par la détente d'un ressort.

Le mouvement de translation, qui avait pour effet commun, dans les deux expériences, de ralentir l'abaissement de l'aile, diminuait l'amplitude des battements, quand la durée en était limitée par la machine, tandis qu'il augmentait la durée du battement unique produit par la détente du ressort, car rien n'empêchait l'action de celui-ci de se produire tout entière.

au vent (§ 27), c'est qu'alors le vent, apportant sans cesse de nouvelle couches d'air sous les ailes, place l'oiseau dans la même condition que s'il avait une translation horizontale dans l'air immobile.

§ 156. Plusieurs auteurs ont indiqué l'influence de la translation de l'oiseau sur la résistance que son aile trouve dans l'air. — A peine avais-je publié les expériences et la théorie précédentes, qu'une réclamation fut adressée à l'Académie par MM. Planavergne[1] qui avaient exposé la même théorie, plusieurs années auparavant.

Quelques recherches bibliographiques me montrèrent encore que l'accroissement de la résistance de l'air, par la translation de l'oiseau avait également été compris et signalé à peu près de la même manière par d'autres auteurs, tels que Silberschlag[2], Cayley, Wenham, Séguin aîné. Ils attribuent l'accroissement de résistance à l'effet des *inerties successives* des colonnes d'air sur lesquelles agit l'aile de l'oiseau.

Wenham[3] trouve, dans cette théorie, l'explication de la manœuvre de tous les oiseaux qui, avant de s'envoler, cherchent

1. Planavergne, *Les mystères de l'aile dévoilés*. Marseille.

2. Silberschlag pense que la résistance à la translation est à la force soutenante, dans le rapport de 1 à 27.

3. Wenham, *De la locomotion aérienne et des lois de la suspension des corps pesants en mouvement dans l'air*. — Rapport de la *Société aéronautique de la Grande-Bretagne*, 1869. Trad. dans l'*Aéronaute*, 1876. — Wenham cite un grand nombre d'expériences intéressantes montrant comment une surface qui se meut dans un fluide, parallèlement à son plan, éprouve plus de résistance à se déplacer perpendiculairement à ce plan.

Qu'on immerge, dit-il, verticalement dans l'eau, le long des flancs d'un bateau, une palette dont le plan soit perpendiculaire à la direction de la marche du bateau ; cette palette rencontrera une certaine résistance. Si l'on vient alors à imprimer à la palette des mouvements de latéralité (autour de son axe), la résistance croîtra tellement, qu'elle pourra même arrêter la marche du bateau.

Les *dérives* qu'on place le long des flancs des bateaux à voile, qui doivent naviguer en basses eaux, ont une action analogue, mais en sens inverse. Elles empêchent le bateau de dériver, parce qu'elles agissent contre des masses d'eau qui, sous l'influence de la translation du bateau, se renou-

à se donner de la vitesse, « de façon à rencontrer toujours « sous leur aile de nouvelles colonnes d'air, *fresch and un-* « *moved.* »

Séguin aîné[1] émet formellement la théorie des *inerties successives* qui accroissent la résistance au coup d'aile, en raison de la translation.

Ainsi, la théorie que je croyais nouvelle était au contraire fort ancienne, mais presque tombée dans l'oubli faute de preuves suffisantes. Mes expériences, en tout cas, n'auront pas été inutiles pour rendre cette théorie indiscutable et surtout pour mesurer les effets de la vitesse de translation de l'oiseau sur la résistance de l'air[2].

§ 157. **Interprétation des effets de l'accroissement de la résistance de l'air, pendant la translation de l'oiseau, par la direction oblique de l'aile sur sa trajectoire.** — Les faits et les théories qui précèdent peuvent être examinés à un autre point

vellent sans cesse et qui, aux vitesses élevées, n'ont pas le temps d'être détournées de leur route. Ainsi agissent les ailes des oiseaux.

On peut se donner la sensation de cette grande résistance au moyen du petit appareil suivant. A l'extrémité d'une baguette cylindrique qui lui sert de manche, on cloue une palette de bois mince. Cet appareil, en forme de T, est présenté à un courant d'eau parallèle au manche; il éprouve une certaine résistance. Qu'on fasse tourner la palette, en imprimant au manche un mouvement de rotation sur son axe, la résistance de l'eau augmentera. Inversement, dans une eau calme, en poussant devant soi la palette, on éprouve une certaine résistance; si on fait pivoter le manche, la résistance sera augmentée.

Il y a un certain rapport à observer entre la largeur de la palette et la vitesse de rotation qu'on doit lui imprimer. Pour les rotations rapides, la palette doit être étroite; or les oiseaux dont le vol est rapide ont les ailes étroites.

1. Séguin aîné, *Mémoire sur l'aviation et la navigation aérienne*. Extrait du *Cosmos*, 1876, p. 8.

2. Il serait intéressant de répéter mes expériences sur la durée du coup d'aile artificiel, avec un appareil immobile, placé dans un vent de vitesse variable; on verrait alors l'influence de ce vent, plus ou moins rapide, sur la durée de l'abaissement des ailes. Comme on ne peut jamais compter sur des conditions atmosphériques favorables, pour une expérience de ce genre, on pourrait recourir au vent régulier produit par un ventilateur puissant.

de vue, et rattachés au cas plus général des plans inclinés qui se déplacent, en faisant un angle plus ou moins aigu avec la direction de leur mouvement.

En effet, supposons que l'expérience du coup d'aile artificiel (§ 145) soit renouvelée devant un champ obscur et fixée sur la plaque sensible d'un appareil photochronographique; elle donnera, suivant que la machine sera immobile ou animée de translation, les images représentées figures 136 et 137.

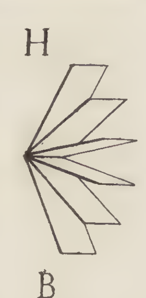


Fig. 136. — Positions successives de l'aile qui s'abaisse quand la machine est immobile.

Dans le cas d'immobilité de la machine, un coup d'aile ne donnera que cinq images, par exemple, ce qui, à raison de cinquante images à la seconde, représenterait une durée de 1/5 de seconde. Avec translation, au contraire, le coup d'aile sera représenté par quinze images (fig. 137), c'est-à-dire qu'on aura pour durée 15/50 ou 3/10 de seconde. Il y aurait là une nouvelle vérification des résultats précédemment obtenus (§ 154 et 155).

Mais voici l'avantage de cette nouvelle méthode. Examinons la trajectoire de l'aile, quand l'abaissement est accompagné de



Fig. 137. — Positions successives de l'aile qui s'abaisse, quand la machine est animée d'une translation rapide.

translation : nous constaterons que sa pointe se meut sur une courbe dont la direction générale est obliquement inclinée sur l'horizon; or, comme le plan de l'aile, en s'abaissant, reste toujours parallèle à l'axe horizontal du vol, il s'ensuit que ce plan est oblique sur la trajectoire.

On retrouve ici les mêmes conditions que dans le cas où un plan, formant avec l'horizon un certain angle, se transporte suivant une ligne horizontale. Or, dans ces conditions, la décomposition de la résistance de l'air par le plan incliné crée une composante qui tend à soulever ce plan. Cette composante serait, dans notre machine, en antagonisme avec la force du ressort qui tend à abaisser l'aile, et ralentirait cet abaissement.

Ces différentes manières de se représenter les effets de la translation de l'oiseau, ou de la vitesse du vent, pour accroître le point d'appui de l'aile, sont identiques au fond. Dans l'une et l'autre interprétation, c'est l'inertie de l'air qui est accrue, soit que l'oiseau, animé de vitesse, rencontre avec son aile des molécules d'air immobiles, soit que le vent, transportant ces molécules, en vienne éteindre la *force vive* contre la surface de l'aile. Dans les deux cas, la résistance de l'air se décomposera suivant les rapports du sinus et du cosinus de l'angle que fait le plan avec le sens du mouvement (§ 139).

L'avantage de cette seconde interprétation serait de réunir sous une même théorie, deux actions très dissemblables au premier abord, la phase d'abaissement et celle de remontée dont on parlera au chapitre prochain.

§ 158. **Déplacement de l'air par le coup d'aile.** — L'air que l'aile a frappé, et sur lequel elle s'est appuyée, pour soutenir et propulser l'oiseau, que devient-il? Descend-il en conservant quelque temps la vitesse qui lui a été communiquée? Forme-t-il un tourbillon dont le mouvement s'éteint en se communiquant à des masses d'air toujours plus grandes? Se réfléchit-il sur la surface de l'aile, comme le voulait Newton, en faisant un angle égal à celui d'incidence? Toutes les hypothèses étaient possibles en présence de l'inertie de l'air en mouvement. Toutefois, à certains signes, on devrait supposer que l'air frappé par l'aile ne subit pas un mouvement d'abaissement. Ce simple fait, que l'oiseau reçoit de son coup d'aile un mouvement de propulsion, suffit à faire prévoir que l'air s'échappe en arrière de l'aile, en sens inverse de la réaction qu'il produit sur le corps de l'oiseau

On a dit § 26 que Wenham, observant le vol des Pélicans à la surface du Nil, vit ces lourds oiseaux voler à moins d'un demi-mètre au-dessus du fleuve, sans en rider la surface par le vent de leurs ailes; l'air ne subissait donc pas un mouvement descendant, mais vraisemblablement s'échappait en arrière, tangentiellement au plan des rémiges.

Enfin, tout le monde a vu, en agitant un éventail, le souffle qui s'en échappe s'écouler en quelque sorte sur les faces de l'instrument et s'échapper suivant le prolongement de son plan. Il fallait donc s'attendre à ce qu'il en fût de même dans le coup d'aile d'un oiseau.

Pour en donner la démonstration, bien des expérimentateurs cherchèrent à rendre l'air visible. Pénaud et le Dr Hureau de Villeneuve voyant que, dans les poussières illuminées par un rayon de soleil, la moindre agitation de l'air devient visible, proposèrent l'emploi de fumées ou de légers duvets en suspension dans l'air, pour faire connaître la direction que lui imprime le coup d'aile d'un oiseau. Mais c'est H. Müller qui sut réaliser à cet égard des expériences tout à fait démonstratives.

Müller[1] construisit de petits appareils mécaniques où la détente d'un ressort imprimait à une sorte d'aile un battement brusque et de peu d'étendue. Quant aux mouvements que ce coup d'aile produisait dans l'air, ils étaient rendus visibles, soit en plein jour au moyen de fumées, soit dans l'obscurité au moyen de vapeurs phosphorescentes[2]. Il vit que la lame d'air comprimée

1. Müller, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. C, p. 1317.

2. La figure 138 montre la disposition de l'expérience de Müller. Un plan mince dont on voit la tranche en $v\,n$ est formé d'une surface flexible terminée d'un côté par une nervure saillante n. Sous l'influence de la détente d'un ressort, ce plan passe soudainement de la position $v\,n$ à la position $v'n'$. Devant le bord v de cette sorte d'aile monte verticalement dans un air absolument calme une colonne de fumée produite par la combustion d'un fil de coton.

Le plan vient-il à s'abattre, il se produit dans la colonne de fumée une trouée transparente formée par la lame d'air qui s'échappe de dessous l'aile. Cette lame entraîne et divise à angle droit la fumée qui continue à se produire en s'élevant par sa légèreté spécifique. La nappe d'air qui s'échappe

sous la face inférieure de l'aile s'échappe sur le prolongement du bord de celle-ci.

suivant le plan de l'aile n'a guère plus de 10 à 14 millimètres d'épaisseur ; elle est, du reste, d'autant plus épaisse que le mouvement de l'aile est plus rapide.

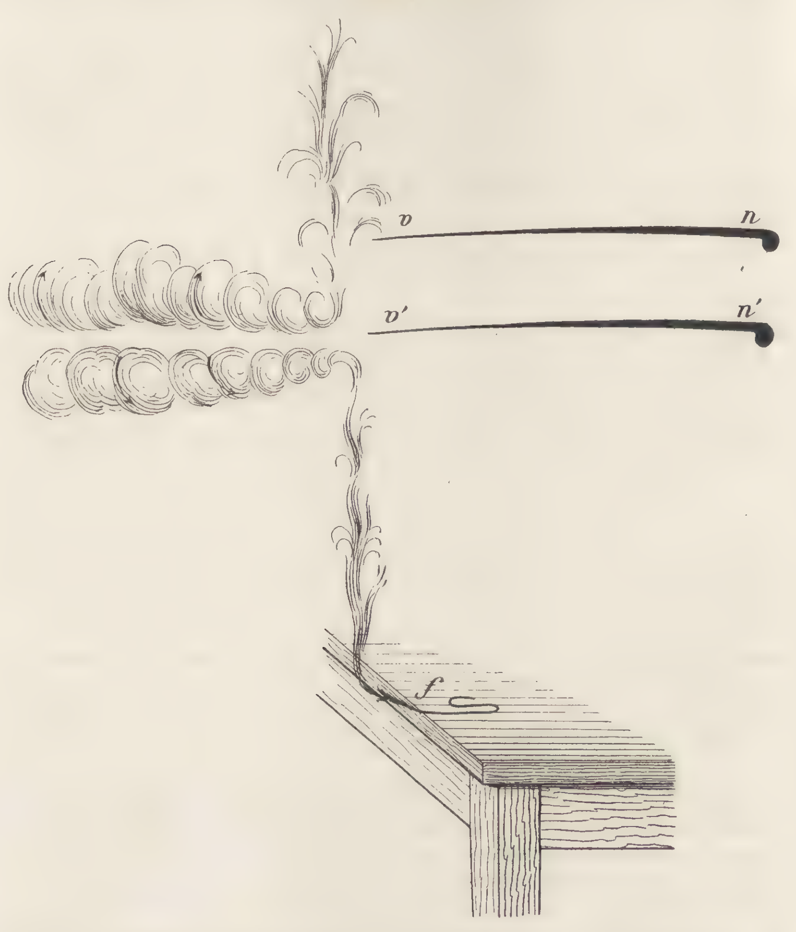


Fig. 138. — Expérience de Müller montrant les mouvements de l'air sous l'influence du coup d'aile. La surface aliforme *vn* est brusquement portée en *v'n'*. La colonne de fumée qui montait verticalement du fil *f* brûlant dans l'air calme est coupée à angle droit par une lame d'air qui s'échappe du côté du voile mince de l'aile ; au-dessus et au-dessous de cette nappe d'air, la fumée roule en tourbillons de sens contraire, comme le montre la direction des flèches.

Cette lame d'air en mouvement, pénétrant dans l'air immobile, y éprouve des résistances et y crée des tourbillons qui grandissent à mesure qu'ils

Il semblerait que, dans le brusque abaissement d'une surface qui la comprime, cette lame d'air dût s'échapper dans tous les sens. C'est bien ce qui arrive en effet, si l'on frappe l'air avec un plan mince, au lieu de l'instrument en forme d'aile d'oiseau. La surface employée par Müller présente, dans sa forme, une disposition qui dirige exclusivement en arrière l'air qui s'échappe de dessous elle. C'est le rebord épais, analogue à celui qui est formé par le squelette et les muscles, sur le bord antérieur de l'aile, qui s'opposant à l'écoulement de l'air par-devant, le rejette tout entier vers le bord postérieur et mince formé par l'extrémité des rémiges.

Pour montrer que la présence d'un relief, sur le bord de la surface en mouvement, retient la nappe d'air et en empêche l'échappement, Müller se sert d'un simple éventail en papier plissé. Après avoir constaté que des mouvements d'une certaine vitesse imprimés à cet éventail donnent naissance à un souffle, il borde l'éventail d'une étroite bandelette de papier formant un relief perpendiculaire à sa surface. Sous l'influence de ce léger obstacle qui retient la nappe d'air comprimé, l'éventail ne souffle plus. Pour obtenir de nouveau l'échappement de l'air suivant les bords de l'éventail, il faut imprimer à celui-ci un mouvement plus rapide : la nappe d'air comprimé augmente alors d'épaisseur et s'échappe par-dessus l'obstacle qu'on lui avait opposé.

Ces ingénieuses expériences rendent matériellement démontrable l'action du coup d'aile sur l'air : elles prouvent que ce fluide compressible ne reçoit pas un choc, à proprement parler,

s'éloignent de leur origine, c'est-à-dire du bord de l'aile ; leur section finit par atteindre jusqu'à 10 centimètres de diamètre avant qu'ils cessent d'être visibles. On observe ces tourbillons sur les deux faces de la nappe d'air entraînante ; mais les mouvements de rotation se font dans deux sens opposés, suivant qu'on les observe au-dessus ou au-dessous de cette nappe.

Ces tourbillons sont particulièrement faciles à voir, lorsqu'au lieu de fumées on emploie des vapeurs phosphorescentes. On les voit, dit Müller, naître, grandir et se propager, en tournant en sens inverse l'une de l'autre, sur les deux faces d'un plan qui prolongerait celui de l'aile.

que ses molécules ne sont point projetées suivant le sens du mouvement de l'aile, mais que l'air se comprime et, en rasant le plan de l'aile, s'échappe suivant le bord postérieur. Ce souffle, comme celui des gaz qui jaillissent d'une fusée, produit une réaction dont l'effet tend à pousser en avant le bord antérieur de l'aile et, avec lui, le corps de l'oiseau tout entier. Mais avant de se transmettre à la masse de l'oiseau, la réaction de l'air agit d'abord sur l'aile et la porte en avant[1], ainsi que l'ont montré les images photographiques § 102. Cette réaction de l'air est traduite d'une façon saisissante par l'expérience qui va être décrite.

§ **159. Automatisme du mouvement d'arrière en avant qui accompagne l'abaissement de l'aile.** — On chercherait vainement, dans l'appareil moteur de l'aile de l'oiseau, un muscle puissant dont les fibres expliqueraient, par leur direction, le mouvement en avant de l'aile qui s'abaisse. C'est par la résistance de l'air que ce mouvement est produit, suivant le mécanisme indiqué tout à l'heure. Le duc d'Argyll[2] a montré qu'on peut s'en convaincre en prenant à la main l'aile d'un grand oiseau, desséchée en extension, et en cherchant à l'abaisser vivement, de façon à frapper l'air par sa face inférieure. Le coup éprouve alors une déviation latérale qui entraîne le bras du côté de la nervure de l'aile, c'est-à-dire de son bord rigide.

Comme tout le monde n'a pas à sa disposition l'aile d'un grand oiseau, il est facile d'y suppléer au moyen d'une construction fort simple (fig. 139) indiquée par M. J. Pline.

§ **160.** — On prend un long bambou, et l'on fixe à son extré-

1. Straus-Durckheim (*Théologie de la Nature*, t. I, p. 247-344 et t. III, p. 341-444) a le premier émis l'opinion que, dans le vol ramé, l'aile qui s'abaisse se porte en avant. Il a même assigné à la pointe de l'aile une trajectoire elliptique, avec orientation du grand axe en bas et en avant, c'est-à-dire en sens inverse de celles que lui attribuaient Borellus et d'Esterno. Toutefois, on s'assurera d'après la figure que Straus-Durckheim a donnée, qu'il ne soupçonnait pas l'étendue de la déviation de l'aile en avant, au moment de son abaissement.

2. D'Argyll, *L'Aéronaute*, juin 1868.

mité flexible une corde qu'on tend comme celle d'un arc, en l'attachant au corps même du bâton, vers son tiers inférieur. Deux autres petits morceaux de bambou sont liés à la tige principale, également courbés en arcs et reliés à la corde qui en rattache tous les sommets entre eux. Sur cette carcasse légère, on colle de l'étoffe ou du papier ; voilà l'appareil tout fait pour la démonstration.

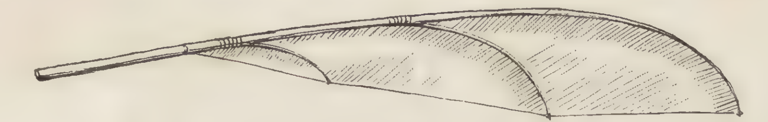


Fig. 139. — Aile artificielle construite d'après le procédé de M. Pline.

Qu'on saisisse le bambou par son manche, et qu'on essaie de frapper l'air à plat, il sera absolument impossible de diriger le coup directement en bas. Plus on y mettra de force et par conséquent de vitesse, plus le bras sera violemment dévié par l'aile factice qui se porte du côté de sa nervure. Rien de plus saisissant que cette petite expérience qui donne, à celui qui la répète, la sensation de la réaction de l'air, et en fait comprendre la puissance, mieux que toute explication.

Si l'on veut compléter l'épreuve et rendre évident le sens du mouvement de l'air, on exécute l'expérience entre deux bougies allumées : celle qui est du côté de la nervure n'éprouve aucune agitation ; l'autre est éteinte, même à une grande distance, par le souffle violent qui s'échappe du bord mince de l'aile. Il n'est donc pas besoin que l'aile, en s'abaissant, se porte en arrière comme la rame d'un bateau, pour produire une réaction qui pousse l'oiseau en avant.

Bien plus, suivant la juste observation de Cayley[1], le mouvement de l'aile en arrière serait inefficace à propulser l'oiseau, à moins d'un coup d'aile d'une rapidité extrême et telle qu'on ne l'observe pas dans le vol de l'oiseau. Supposons en effet qu'un

1. Cayley, *loc. cit.*

oiseau ait une translation de 15 mètres par seconde; un coup d'aile de 15 mètres de vitesse en arrière n'aurait aucune action, et ne ferait que suivre le mouvement de l'air qui fuit. L'aile devrait donc avoir une vitesse excédant 15 mètres, de toute la valeur nécessaire pour trouver, sur l'inertie de l'air, un appui suffisant.

§ 161. **Angle que le plan des rémiges forme avec l'horizon dans le coup d'aile.** — Les expériences graphiques relatées au chapitre VI ont montré que, dans le coup d'aile, les rémiges s'infléchissent sur la résistance de l'air, et qu'à la fin de l'abaissement, la force élastique des rémiges leur restitue la courbure normale, en abaissant le bord postérieur de l'aile. Mais c'est tout ce qu'on peut déduire de ces expériences; il serait imprudent de leur demander l'amplitude véritable du mouvement angulaire exécuté par la flexion des rémiges. La photographie instantanée nous renseigne bien mieux à cet égard; elle donnera des mesures tout à fait précises, quand on disposera d'objectifs photographiques plus puissants.

Telles qu'elles sont aujourd'hui, les images montrent que, pendant le coup d'abaissement, quand l'aile est arrivée à l'horizontalité, le plan des rémiges est incliné de 6° à 8° sur l'horizon, la face inférieure de ces plumes regardant un peu en arrière et en dehors[1].

1. A une phase plus avancée de leur abaissement, les ailes se portent en avant et se rapprochent l'une de l'autre, en tournant en dedans leurs faces inférieures. La torsion des rémiges, très prononcée alors, indique une soufflerie qui se produirait de haut en bas. Ces attitudes qui ne peuvent s'expliquer par des paroles, mais qui se voient très bien sur les figures en relief, ne semblent se produire qu'au début du vol.

CHAPITRE XVII

DE LA REMONTÉE DE L'AILE

La remontée de l'aile est tantôt active et tantôt passive. — Remontée active de l'aile, au moment de l'essor; rotation des rémiges. — Remontée passive de l'aile, quand l'oiseau a de la vitesse. — Composante horizontale de l'air contre l'aile remontante. — Rapport de la résistance horizontale à la poussée verticale, sur l'aile remontante. — Pendant sa remontée, l'aile doit avoir des inclinaisons différentes, suivant la vitesse de l'oiseau. — L'aile remontante ne presse pas l'air par sa face supérieure. — La poussée verticale que l'air exerce sous l'aile de l'oiseau semble régler la fréquence des coups d'aile.

§ 162. **La remontée de l'aile est tantôt active et tantôt passive.** — La remontée de l'aile peut se faire de deux façons : soit par l'action du muscle spécial que l'on connaît déjà (§ 40), soit par l'action du vent qui frappe obliquement la face inférieure de l'aile, et la soulève par le mécanisme du cerf-volant.

Ce second genre de remontée de l'aile exige qu'un vent, absolu ou relatif, souffle en face de l'oiseau; si l'air est calme, et si l'oiseau n'a pas encore acquis de vitesse, c'est l'action musculaire seule qui produit la remontée de l'aile.

Ainsi, quand du fond d'un taillis, un Faisan ou une Bécasse s'envole et monte verticalement jusqu'à la cime des arbres; quand un Pigeon s'élevant du pied d'une maison va se poser sur le bord du toit, l'aile de ces oiseaux est active dans la montée comme dans la descente, ses muscles antagonistes sont dans un travail incessant.

Mais si une Mouette vole contre le vent, son aile, en remontant, est vigoureusement soulevée par l'air qui agit sur sa face inférieure. Le grand pectoral doit même résister à cette force soulevante, pour en ralentir l'effet.

Il ne semble pas que ces deux mécanismes distincts puissent concourir à la remontée de l'aile ; il est plutôt probable que, suivant le cas, la remontée de l'aile est *active*, c'est-à-dire produite par l'action musculaire, ou *passive*, c'est-à-dire produite par l'action de l'air.

§ 163. **Remontée active de l'aile, au moment de l'essor ; rotation des rémiges.** — On a vu § 40 comment le tendon du pectoral moyen, après avoir contourné l'articulation de l'épaule et la tête de l'humérus, se fixe à cet os. L'action de ce muscle est d'élever l'aile ; on voit très bien sur l'oiseau mort comment en tirant le tendon du pectoral moyen, cette traction se réfléchit sur l'articulation de l'épaule, comme sur une poulie, et soulève l'aile de l'oiseau. On constate même que, dans ce soulèvement, l'aile se meut obliquement. Mais l'action de l'élévateur est certainement très faible, en raison du petit volume[1] de ce muscle comparé à celui de l'abaisseur. L'élévateur de l'aile ne saurait donc produire un travail important ; bien loin de pouvoir utilement

1. Legal et Reichel désignent sous le nom de *subclavius*, sous-clavier, le muscle que les anatomistes français appellent *pectoral-moyen* avec Vicd'Azyr, ou *sous-épineux* avec Alix. Ces désignations diverses montrent que l'anatomie comparée n'est pas fixée sur les caractères homologiques de l'élévateur de l'aile.

Le rapport du poids du muscle élévateur de l'aile à celui de son abaisseur change beaucoup suivant les espèces.

Voici, d'après Legal et Reichel, le rapport des poids de ces muscles, chez quelques oiseaux :

	B. Poids de l'abaisseur.	A. Poids de l'élévateur.	Rapport $\frac{B}{A}$
Moineau	3gr,00	0gr,32	9,37
Étourneau	6 ,90	0 ,83	8,31
Pigeon	30 ,00	5 ,50	3,45
Perdrix	38 ,00	12 ,70	3,00
Pie	12 ,75	1 ,05	12,00
Corneille	38 ,10	2 ,62	14,12
Canard	59 ,35	7 ,54	7,87
Mouette	23 ,40	2 ,20	10,63
Faucon	16 ,35	0 ,30	54,50
Buse	47 ,70	2 ,62	18,20
Aigle	224 ,00	12 ,60	17,77

servir à la propulsion de l'oiseau[1], il serait même incapable de relever l'aile si, par un mécanisme fort curieux, les rémiges ne se laissaient traverser par l'air, sans lui offrir de résistance. Voici en quoi consiste ce mécanisme.

On a souvent comparé au jeu des lames d'une persienne le pivotement des rémiges qui tantôt s'accolent les unes aux autres, et tantôt laissent entre elles des intervalles par où l'air passe librement. Un appareil musculaire et ligamenteux fort compliqué préside à ce mouvement (§ 48).

§ **164**. — Si l'on s'en rapporte à la description donnée par Alix[2], la rotation des rémiges est solidaire des mouvements de flexion et d'extension de l'avant-bras sur le bras, avec une association telle que, par l'effet même de la flexion de l'aile qui remonte, les rémiges se séparent les unes des autres et livrent passage à l'air.

Ce pivotement des rémiges, pendant la remontée de l'aile, était théoriquement admis depuis longtemps. Marchand[3], qui le considère comme très utile au vol, a même entrepris quelques démonstrations expérimentales sur les avantages de ce mécanisme.

D'autre part, ceux qui, à l'exemple de Seguin, ont essayé de construire des appareils volant au moyen d'ailes artificielles, ont donné à ces ailes, par différents moyens, les propriétés d'une soupape s'ouvrant à l'air de haut en bas, c'est-à-dire pendant la remontée. Mais l'œil ne peut saisir ce mouvement des rémiges pendant le vol des oiseaux, l'existence en était même contestée par beaucoup d'auteurs[4].

La photographie instantanée montre très clairement que la remontée de l'aile, dans les premiers instants du vol tout au

1. Certains auteurs ont cru que l'aile remontante avait une action propulsive : Cayley le premier émit cette idée qui fut reproduite par Wenham et par Pénaud; on verra que c'est une erreur.

2. Alix, *Essai sur l'appareil locomoteur des oiseaux*, p. 338.

3. Marchand, *De la rotation des rémiges* (l'Aéronaute, 1870, p. 75).

4. D'Esterno, *loc. cit.*, passim.

moins, s'accompagne d'un pivotement des rémiges qui laissent entre leurs surfaces un intervalle appréciable. La figure 140 le fait voir clairement; elle représente quatre images photochronographiques d'un Canard, *au moment de l'essor*, et à une phase toujours plus avancée de la remontée des ailes. On peut suivre, sur cette série, tous les degrés du pivotement des rémiges.



Fig. 140. — Canard à différents degrés de la remontée de l'aile. A partir de la première figure à droite, les suivantes représentent des phases de plus en plus avancées de la remontée.

Sur d'autres photographies, prises quand l'oiseau était *en plein vol*, on ne voit pas trace de disjonction des rémiges, pendant la remontée de l'aile. Cette disposition ne se voit pas non plus sur les silhouettes que donne le fusil photographique.

C'est au début du vol que la rotation des rémiges est nécessaire; et tout ce qui l'empêche de se produire empêche aussi l'oiseau de prendre son essor : c'est ainsi, j'imagine, que doit agir la glu dont on se sert pour attraper les oiseaux.

Si, dans les premiers coups d'ailes, les rémiges ne tournaient pas sur leur axe, et si, malgré cela, le muscle pectoral moyen avait la force d'accomplir la relevée, la face supérieure de l'aile, imperméable à l'air, frapperait ce fluide de bas en haut. Il en résulterait alors une réaction verticale descendante qui tendrait à précipiter l'oiseau vers le sol, ou tout au moins lui ferait perdre

de sa hauteur. Or l'oiseau ne s'abaisse pas pendant la remontée de l'aile : la méthode graphique (§ 83) et la photochronographie (§ 92), en ont donné la preuve[1].

Borellus avait déjà compris que l'aile remontante devait échapper à la résistance de l'air; il supposait qu'à ce moment l'aile se présentait à l'air par son bord tranchant[2]. Or la disposition anatomique de l'articulation de l'épaule ne permet pas à l'aile de diriger son bord antérieur en haut; cette théorie est donc inacceptable.

§ **165. Remontée passive de l'aile, quand l'oiseau a de la vitesse.** — Dès que l'oiseau a pris de la vitesse, et surtout quand il vole contre le vent, l'aile effectue sa remontée sans efforts. Les plus anciens observateurs et les fauconniers avaient déjà noté des exemples de l'action soulevante que produit l'air quand il agit sous la surface oblique des ailes d'un oiseau animé de vitesse. Le phénomène de la *ressource* et celui de la *pointe* (§ 4), par lesquels un oiseau transforme brusquement sa vitesse en ascension, montrent que, sous un certain angle, l'aile trouve, dans la pression de l'air, une *composante verticale* (§ 5) qui peut élever le corps de l'oiseau à des hauteurs parfois très grandes.

Cette élévation du corps implique une certaine tension des muscles pectoraux, pour tenir les ailes rigidement étendues. Un relâchement complet de ces muscles entraînerait au contraire cette conséquence, que les ailes seraient librement soulevées par le vent et que le corps, non soutenu, tomberait par l'action de la pesanteur.

On peut évaluer l'effort résistant du muscle d'après l'égalité de son moment d'action avec celui de la pression de l'air, sous l'aile remontante. Mais, en faisant cette évaluation, il faut considérer

1. Quelques oiseaux même, comme le Canard en plein vol, éprouvent une ascension très prononcée quand l'aile remonte, mais alors cette remontée se fait sans l'intervention musculaire.

2. « Sic enim, absque aeris impedimento, veluti a gladio, motus sursum alæ plane fieri possit. »

que la résultante des pressions de l'air sous l'aile n'a pas le même point d'application dans la remontée que dans la descente.

Pendant sa descente, l'aile est animée d'un mouvement angulaire par suite duquel ses différents points ont des vitesses inégales, de telle sorte que le *maximum* de pression correspond à la *pointe de l'aile*. Pendant la remontée, au contraire, c'est la *partie interne de l'aile* qui reçoit le *maximum* de pression. En effet, l'air presse la face inférieure de l'aile en raison de sa vitesse relative. Cette vitesse serait la même pour tous les points d'une aile immobile; mais, dans la remontée, les parties voisines de la pointe de l'aile, ayant plus de vitesse ascendante, se dérobent, jusqu'à un certain point, à la pression de l'air au-dessous d'elles.

C'est cette différence d'action des diverses parties de la surface de l'aile qui m'avait conduit à appeler *aile active* la région formée par les rémiges primaires et qui, animée d'une grande vitesse, trouve son appui sur l'air, dans le coup d'abaissement. J'appelais au contraire *aile passive*, la partie interne de l'aile qui, agissant plutôt à la façon d'un cerf-volant, se laisse soulever par l'air[1]. Liais[2], d'Esterno[3], Wenham[4] avaient déjà donné la même théorie du soulèvement de l'aile, par l'action du vent sous sa surface obliquement inclinée.

1. Marey, *La machine animale*, p. 287. J'ai retrouvé, dans Cayley, cette même distinction de l'*aile active* et de l'*aile passive*, mais prise dans un autre sens : l'aile passive, pour lui, est synonyme d'aile voilière. Du reste, Cayley ne croyait pas que, dans le vol ramé, l'air exerçât sous l'aile une action soulevante.

2. Liais, *Sur le vol des oiseaux* (C. R. de l'Académie des sciences, avril 1861).

3. D'Esterno, *Du vol des oiseaux* (à la Librairie nouvelle, Paris, 1861).

4. Wenham, *Rapport annuel de la Soc. aéronautique de la Grande-Bretagne*, 1866 (trad. de l'*Aéronaute*, 1876). Voici en quels termes Wenham définit l'action de l'air dans la remontée de l'aile :

« Pendant l'abaissement de l'aile, on comprend aisément comment l'oiseau est soutenu, mais dans le relèvement, le poids est également supporté, car, pendant qu'elle se relève, l'aile s'incline légèrement en haut contre le courant d'air, et comme l'angle ainsi formé est légèrement en excès sur celui du sillage de relèvement, l'oiseau se trouve autant soutenu dans le relèvement que dans l'abaissement. »

§ 166. Composante horizontale de l'action de l'air sur l'aile remontante. — En même temps que la composante verticale qui soutient l'oiseau, le vent produit une composante horizontale qui entraîne l'aile en arrière. Les effets de cette force sont très sensibles sur la trajectoire de l'aile de la Buse (fig. 141). Dès la fin de son abaissement, l'aile commence à subir un entraînement en arrière qui, combiné avec la remontée, lui fera parcourir une courbe à concavité antérieure. Ainsi se complète l'ellipse commencée dans la phase d'abaissement.

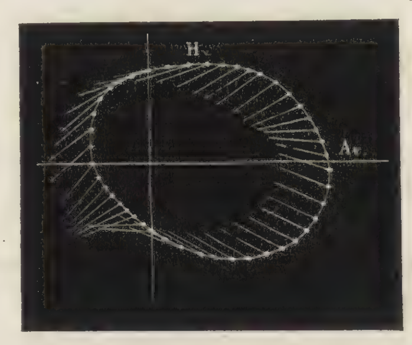


Fig. 141. — Trajectoire de l'aile de la Buse. On voit que l'aile, pendant sa remontée, est entraînée en arrière par l'action de l'air.

Dans cette trajectoire elliptique, les forces extérieures interviennent au moins autant que l'action musculaire. C'est, en effet, la résistance de l'air qui porte énergiquement en avant l'aile qui s'abaisse (§ 160); c'est encore la résistance de l'air qui porte en arrière l'aile remontante. Enfin, vers le haut de sa course, l'aile, en se déployant, porte sa pointe en avant, d'une manière très brusque, et achève de former l'ellipse par courue. Cela se voit fort bien dans le vol du Pigeon (fig. 94, 95, 96).

La composante horizontale du vent *absolu* ou *relatif* n'agit pas seulement pour porter l'aile en arrière, elle ralentit aussi la vitesse de l'oiseau. Ce ralentissement, qu'ont démontré la méthode graphique (§ 85) et la photochronographie (§ 117), est d'une grande importance; il prouve, à lui seul, que *la remontée de l'aile n'est jamais propulsive* comme le supposaient Cayley, Wenham et Pénaud.

§ 167. Rapport de la poussée verticale à la poussée horizontale sur l'aile remontante. — Dans la décomposition de la résistance de l'air contre la surface oblique de l'aile, la poussée

verticale, qui soutient l'oiseau et remonte son aile, est l'élément utile; tandis que la poussée horizontale, qui ralentit la vitesse du vol, peut être considérée comme l'élément nuisible. Or, on a vu § 139 que, pour les petits angles, ces deux forces varient en sens inverse l'une de l'autre quand on fait changer l'inclinaison de l'aile sur la direction du vent. Plus l'angle est aigu, plus la composante verticale[1] l'emporte sur la composante horizontale. L'oiseau aurait donc toujours intérêt à présenter au vent son aile remontante, sous un angle très aigu, s'il trouvait, malgré cela, une composante verticale suffisante pour le soutenir. Mais il n'en est point ainsi, car à mesure que l'angle d'inclinaison de l'aile diminue, les deux composantes de l'action de l'air diminuent aussi, quoique dans un rapport inégal. Sous un angle trop aigu, l'aile de l'oiseau ne trouvera, il est vrai, presque pas de résistance horizontale *retardatrice* dans l'air, mais elle ne trouvera pas non plus assez de force *soutenante* et l'oiseau perdra de la hauteur.

Quelques exemples numériques feront mieux comprendre les conditions du problème. Avec une vitesse de 10 mètres, un plan d'une certaine surface, incliné sous un angle de 10°, éprouve une poussée verticale de 132 grammes et une poussée horizontale de 15 grammes. Si le poids à soutenir n'est que de 132 grammes, l'angle de 10° sera convenable; mais si le poids est plus lourd, 210 grammes par exemple, il faudra que la poussée verticale atteigne cette même valeur. Or, s'il était facultatif d'imprimer au plan une vitesse plus grande, on accroîtrait, suivant le besoin, la poussée verticale, en augmentant convenablement la vitesse, sans changer l'angle du plan. Mais si, forcé de conserver la même vitesse, on veut accroître la valeur absolue de la poussée verticale, il faudra ouvrir l'angle et le porter à 25°; la valeur des deux poussées s'élèvera alors, et le poids de 210 grammes sera soutenu. Mais, alors aussi, la poussée horizontale aura augmenté dans un rapport plus grand que l'autre : elle atteindra 95 grammes.

L'angle de 25° sera donc moins favorable que celui de 10°, en

ce qu'il fera perdre à l'oiseau plus de vitesse de translation. Mais cet angle sera *imposé* à l'oiseau par la nécessité de se soutenir contre la pesanteur.

Ainsi, quand il possède une grande vitesse, l'oiseau se soutient en trouvant peu de résistance à sa translation, car il peut attaquer l'air sous un angle très aigu. Il perdra moins de sa *force vive*, c'est-à-dire du *travail* emmagasiné dans sa masse par l'accélération que les coups d'ailes antérieurs lui ont imprimée. Il suit de là que, dans le plein vol, l'entretien d'une grande vitesse coûte moins de travail que n'en a coûté, à l'essor, l'acquisition d'une faible vitesse.

§ **168. En plein vol, l'aile remontante ne presse pas l'air par sa face supérieure.** — Si la face supérieure de l'aile frappait l'air de bas en haut, comme le croyaient certains auteurs, il en résulterait bien une force propulsive, mais il se produirait en même temps une perte de hauteur.

On a vu, ci-dessus, qu'à l'essor, cette perte de hauteur n'existe pas[1], et l'on sait par quel curieux artifice, chez les oiseaux à essor rapide, chacune des rémiges, pivotant sur son axe, fend l'air au lieu de le frapper. Mais, en plein vol, le pivotement des rémiges n'a plus de raison d'être et cesse de se produire, aussi bien que le reploiement de l'aile auquel il est automatiquement associé. Cherchons comment il se fait que la face supérieure de l'aile ne frappe pas l'air.

La figure 142 aidera à faire comprendre ce qui se passe. Soit *tt*, une planche horizontale dont on ne voit que la tranche; au milieu de cette planche est une fente verticale dans le plan de

1. Cependant, de Labouret analysant les figures photochronographiques du vol du Goéland a trouvé que, dans les premiers coups d'ailes, il se produit une réaction qui abaisse le corps, comme si la face dorsale de l'aile agissait sur l'air. Mais, outre que ces réactions ne se produisaient pas dans le vol d'autres oiseaux, il faut observer que l'*essor* de notre Goéland se faisait dans des conditions pour ainsi dire artificielles. L'oiseau étant soudainement lâché à une certaine hauteur au-dessus du sol, et sans vitesse préalable, se trouvait dans des conditions tout à fait inusitées pour lui; le caractère des battements de ses ailes pouvait s'en ressentir.

laquelle passe la tige 1, inclinée d'un certain angle sur l'horizon. Dans la rainure est une bille b', en contact avec la tige inclinée. Imaginons que cette tige s'élève verticalement, sans changer d'inclinaison, et passe dans la position 2, la bille sera repoussée par la tige inclinée et prendra la position b'' ; une nouvelle ascension de la tige en 3 conduira la bille en b''', etc.

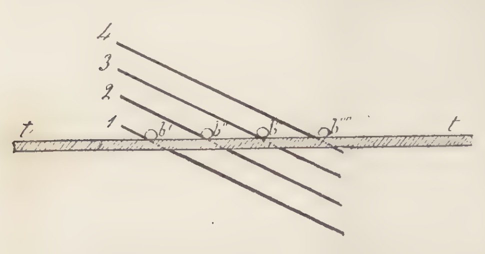


Fig. 142. — Figure théorique montrant la relation de la vitesse de l'air et de la vitesse de l'aile remontante, quand l'oiseau est animé de translation.

La bille poussée graduellement par le mouvement ascensionnel de la tige inclinée a toujours gardé le contact avec cette tige dont elle a reçu une certaine vitesse. Or, si la bille avait été animée d'une vitesse un peu plus grande que celle que peut lui communiquer la tige, celle-ci ne l'eût jamais rencontrée.

Au lieu de la bille b, considérons le cas d'une molécule d'air entraînée par un vent absolu ou relatif. Si cette molécule

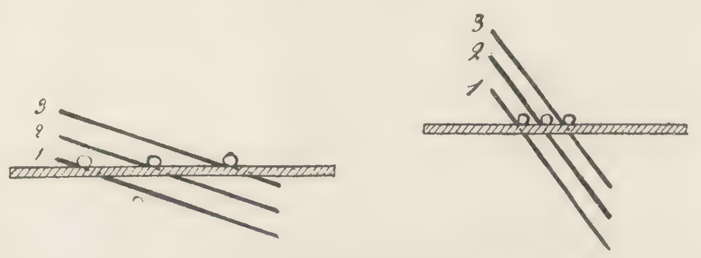


Fig. 143. — Influence de l'angle que forme l'aile avec la direction du mouvement, sur la pression de l'air au-dessous d'elle.

a plus de vitesse qu'elle n'en pourrait recevoir du mouvement oblique de l'aile ascendante, elle ne sera pas atteinte par celle-ci ; en d'autres termes, l'aile n'exercera aucune pression contre cet air, qui se dérobera à son contact.

La pression ou la non pression de l'air contre la face supérieure de l'aile dépend de plusieurs conditions :

1° De la vitesse du vent relatif, ainsi qu'on vient de le voir;

2° De la vitesse de l'élévation de l'aile, ce qui se comprend aussi bien;

3° Enfin, de l'inclinaison de la surface alaire.

La figure 143 montre que, plus le plan de l'aile est incliné, plus, à égale vitesse d'ascension, ce plan imprimera de vitesse horizontale à la molécule d'air qu'il touche; plus, par conséquent, cette molécule devra avoir de vitesse horizontale, pour échapper au contact de l'aile montante. Ce n'est donc que par un grand vent, ou dans un vol très rapide, que l'oiseau pourra orienter son aile sous un angle très petit avec la direction du vent. A l'essor, au contraire, et dans un air calme, les rémiges fendront l'air individuellement, suivant une direction presque verticale.

La poussée verticale que l'air exerce sous l'aile de l'oiseau semble régler la fréquence des coups d'ailes. L'observation montre, en effet, que l'oiseau qui a atteint un certain degré de vitesse ralentit la fréquence de ses coups d'ailes. Un sens musculaire délicat semble avertir l'animal du degré de sustention que lui fournit la résistance de l'air. Peut-être celle-ci, quand elle est excessive, fait-elle obstacle à l'effort musculaire qui produit le coup d'abaissement. L'oiseau retarde alors son coup d'aile, jusqu'à ce que sa vitesse diminuée réduise assez la force de sustention pour rendre nécessaire un nouveau battement.

L'expérience déjà relatée § 61 m'a confirmé dans cette manière d'interpréter les variations de la fréquence des coups d'ailes sous l'influence de la vitesse de l'oiseau.

QUATRIÈME PARTIE

DES DIFFÉRENTS GENRES DE VOL

CHAPITRE XVIII

DES VARIÉTÉS QUI S'OBSERVENT DANS LE VOL DES OISEAUX

Les diverses espèces d'oiseaux présentent des différences dans leur manière de voler. — Différences que présente le vol d'un oiseau, suivant l'instant où on l'observe. — Conditions expérimentales dans lesquelles on peut faire voler des oiseaux. — Influence du vent, absolu ou relatif, sur les caractères du vol ramé. — Du vol sans coups d'ailes. — Identité des effets du vent dans tous les genres de vol. — Il est utile de distinguer le vol plané du vol à voile. — Le mécanisme du cerf-volant éclaire celui du vol sans coups d'ailes. — Moyen d'analyser, avec précision, les différents actes du vol sans coup d'ailes.

§ 169. **Les diverses espèces d'oiseaux rameurs présentent des différences dans leur manière de voler.** — La simple observation montre que chaque espèce d'oiseaux a son type de vol caractéristique, fort difficile sans doute à définir, mais qu'un œil exercé reconnaît d'instinct. Avec les moyens d'analyse dont nous disposons maintenant, il faudra que les différents types du vol se caractérisent d'une manière aussi nette que les formes anatomiques d'après lesquelles se différencient les espèces d'oiseaux. Rien ne saurait être plus fructueux pour l'intelligence du mécanisme du vol, que ce rapprochement des caractères fonctionnels et des caractères anatomiques.

La photographie instantanée saisit, et fixe en même temps, le caractère de la fonction et celui de l'organe qui l'accomplit; elle permet donc la comparaison la plus importante, celle qui anime, en quelque sorte, la morphologie et lui donne sa signification véritable.

Parmi les différentes méthodes basées sur l'emploi de la photographie instantanée, il s'agit de choisir la plus parfaite, celle qui s'applique le mieux au but que nous nous proposons.

La photochronographie sur champ obscur est la plus simple, mais elle ne donne que les images d'oiseaux blancs et n'a par-conséquent que des applications restreintes.

L'*analyseur* photochronographique à bande sans fin (§ 100) permettra d'opérer sur tout oiseau, quelle qu'en soit la couleur et quel que soit le fond devant lequel il vole. Cet instrument présente, en outre, l'avantage de donner un nombre d'images distinctes bien plus grand que la photochronographie ordinaire, et par conséquent de saisir plus complètement les différences qui existent chez les diverses espèces dans les phases d'un battement d'aile.

Mais il y a trop peu de temps que j'ai réalisé cet appareil, et le nombre des applications que j'en ai pu faire est encore trop restreint pour se prêter à la comparaison des types du vol chez les différents oiseaux rameurs : une telle étude exigera un long travail.

On peut toutefois, en comparant les images de différentes espèces d'oiseaux, montrer que tous les rameurs exécutent les mêmes actes, dans un battement d'ailes, à part la fréquence des battements et peut-être la durée relative de leurs différentes phases.

Les types qui vont être représentés ci-après sont au nombre de six (fig. 144 à 149). Les uns appartiennent à des oiseaux franchement rameurs, le Pigeon et le Canard, ou à des espèces capables de faire de longs planements en glissant sur l'air, comme le petit Héron blanc et le Héron aigrette. Les autres enfin se rapportent à des oiseaux qui pratiquent le vol à voile,

soit par les grands vents, comme le Goéland, soit par des vents très modérés, comme le Pélican[1].



Fig. 144. — Pigeon (dix images par seconde).
L'échelle au bas de la figure représente la longueur d'un mètre.



Fig. 145. — Canard (photogravure).

1. C'est grâce à l'obligeance de mes amis, A. Milne Edwards et A. Geoffroy Saint-Hilaire, que j'ai pu étudier ces oiseaux qui appartenaient, les

La plupart de ces figures ont été reproduites par la gravure; elles ne sont donc pas assez fidèles pour se prêter à une analyse



Fig. 146. — Petit héron blanc.



Fig. 147. — Héron aigrette (vol ascendant puis horizontal).

uns au Muséum d'histoire naturelle, les autres au Jardin zoologique d'acclimatation.

rigoureuse, mais elles donnent une idée de la variété d'aspects que présentent certaines espèces, à divers instants du vol ramé.



Fig. 148. — Goéland, vol horizontal (dix images par seconde).



Fig. 149. — Pélican (vol descendant).

De la comparaison de ces différents types de vol ressort, tout d'abord, l'impression de différences ; puis, peu à peu, on arrive à

saisir, à travers ces dissemblances superficielles, de profondes analogies, et l'on trouve toutes sortes de transitions entre les types fonctionnels. De sorte que l'axiome de Linné : *Natura non facit saltus*, domine aussi bien la physiologie comparée que la morphologie.

§ 170. Différences que présente le vol d'un oiseau, suivant l'instant où on l'observe. — Aux particularités qui sont liées à la conformation spéciale de chaque espèce s'en ajoutent d'autres, non moins importantes, qui tiennent à l'effet que l'oiseau veut obtenir. Le vol change de caractères à chaque instant ; les mouvements des ailes ne sont pas les mêmes à l'essor, en plein vol et au moment de l'arrêt. On a vu § 23 que, dans le vol du Pigeon, l'œil peut déjà saisir certaines différences qui se produisent à ces divers instants et qui consistent en un déplacement de l'angle d'oscillation des ailes. Les mouvements du vol changent également, suivant que l'oiseau veut monter ou descendre; accélérer, ralentir ou arrêter son vol.

La photochronographie, avec le nouvel appareil analyseur, donnera certainement, sur les caractères du vol, tous les renseignements nécessaires. Mais une condition préalable pour aborder ces intéressantes études sera de disposer d'oiseaux bien apprivoisés que l'on puisse faire voler à sa guise, dans toutes sortes de circonstances. Jusqu'ici, je n'ai pu réaliser ces conditions ; je ne puis donc montrer au lecteur que les rares exemples des variétés ordinaires du vol ramé qui se sont produites au-devant de mes appareils.

On voit (fig. 150) un Pigeon qui volait en montant. L'oiseau s'élevait d'abord sous un angle de 20° environ, puis tendait à monter davantage. A la fin de la phase représentée, l'axe du corps se redressait presque verticalement; le vol lui-même tendait à prendre une direction verticale, car le Pigeon allait se poser sur le toit d'un hangar au-devant duquel on le faisait voler[1].

1. Si l'on suit la série des attitudes successives du Pigeon dans cette figure, on voit qu'elles se succèdent dans l'ordre inverse de la suite naturelle des phases d'un coup d'aile. Cela tient à la différence de fréquence

La figure 151 montre les phases de l'arrêt d'un Canard qui va se poser sur le sol. Du commencement à la fin de cette figure,



Fig. 150. — Pigeon, vol ascendant ; les images successives se suivent dans l'ordre inverse du mouvement réel.

on voit changer l'inclinaison du corps. Oblique déjà dans la première image, parce que déjà l'oiseau tendait à descendre et



Fig. 151. — Coups d'aile d'arrêt d'un Canard.

à ralentir sa vitesse, l'axe du corps est bientôt vertical, puis se renverse en arrière, dans l'avant-dernière image, quand les

qui existe entre les éclairements de l'appareil photographique et les coups d'ailes de l'oiseau. Ce phénomène a été expliqué § 101 à propos de la *stroboscopie*.

pattes arrivent en contact avec le sol. A partir de cet instant, l'axe du corps bascule en avant et le Canard serait projeté le bec contre terre, s'il ne courait pendant un certain temps, en même temps qu'il éteint sa vitesse au moyen des battements d'arrêt dont il a été question précédemment.

Nous pouvons maintenant définir ces battements d'arrêt. Comparons en effet la première image à la quatrième (fig. 151), nous trouvons la même phase du coup d'aile : la fin de l'abaissement; mais la direction du mouvement est bien différente dans les deux cas. Le coup d'aile est donné presque verticalement dans la première image, presque horizontalement dans la quatrième. De sorte que la composante verticale qui, dans le premier cas, soutenait l'oiseau contre la pesanteur, se transforme, dans le second, en une composante dirigée d'avant en arrière et dont l'effet est nécessairement d'éteindre la vitesse du vol. En même temps, la composante horizontale qui, tout à l'heure, propulsait l'oiseau, a maintenant changé de sens et, s'exerçant de bas en haut, a pour effet d'empêcher une chute trop brusque sur le sol.

Les mouvements de l'essor présenteront aussi de curieuses particularités : il sera intéressant d'assister aux différentes manœuvres par lesquelles l'oiseau tend à acquérir de la vitesse, avant de battre des ailes. L'étude de l'essor, aussi bien que celle du plein vol, exigera l'emploi d'oiseaux apprivoisés.

D'après quelques essais, bien insuffisants encore, il m'a semblé que l'oiseau qui s'envole d'un perchoir se comporte tout autrement que celui qu'on laisse tomber d'une certaine hauteur. Dans le premier cas, il commence par relever activement ses ailes; dans le second, il les laisse relever par l'air dont la pression s'exerce de bas en haut.

§ 171. **Conditions expérimentales dans lesquelles on peut faire voler des oiseaux.** — L'essence de la physiologie expérimentale est de changer les conditions dans lesquelles une fonction se produit, afin de voir quels changements s'ensuivent du côté de la fonction elle-même.

Certains auteurs ont pratiqué, sur les oiseaux, des expériences qui ont donné d'importants résultats. Mouillard a rogné les rémiges d'un Pigeon, de manière à réduire de moitié la largeur de ses ailes ; il transformait ainsi, au point de vue des formes, un oiseau rameur en un voilier. A la suite de cette mutilation, il vit changer le type du vol : le Pigeon ne volait que très difficilement par les temps calmes ; mais, comme on lui avait donné les formes d'un Procellaria, il volait plus aisément quand le vent soufflait en tempête.

A titre de contre-épreuve, Mouillard augmenta la surface des ailes d'un autre Pigeon. Il recourut, pour cela, au procédé par lequel les fauconniers adaptent des rémiges neuves à leurs oiseaux mutilés. Le Pigeon dont la voilure avait été ainsi augmentée fut visiblement gêné dans son vol.

J'ai fait autrefois des expériences d'un autre ordre sur des oiseaux dont j'inscrivais les battements d'ailes. Ces oiseaux étaient chargés de poids graduellement croissants et l'on voyait, sous cette influence, augmenter la fréquence et l'étendue des coups d'ailes. Une Buse peut encore voler avec une charge de 125 grammes, un Pigeon avec une charge de 60 grammes.

Il sera important de reprendre ces expériences, en analysant d'une manière exacte les modifications qui surviennent dans les mouvements du vol, soit lorsqu'on change la forme ou l'étendue des ailes, soit lorsqu'on charge l'oiseau de poids plus ou moins lourds. On pourra même combiner, de différentes façons, les modifications des surfaces et des poids ; enfin, placer ces poids de diverses manières, de façon à changer la position du centre de gravité de l'oiseau.

L'observation montre déjà qu'en enlevant une proie plus ou moins pesante, les Rapaces s'élèvent sous des angles plus faibles : Audubon raconte que l'Aigle pêcheur ne peut s'élever que sous un angle très aigu, lorsqu'il a saisi un poisson.

C'est dans les expériences de ce genre qu'on trouvera les éléments les plus précieux pour étudier le problème mécanique du vol, avec toutes les variétés qu'il comporte.

§ 172. **Influence du vent absolu ou relatif sur les caractères du vol ramé.** — C'est encore à des expériences du même genre qu'il faudra recourir, pour déterminer l'influence du vent *absolu* ou *relatif* sur les caractères du vol ramé. Soit qu'on laisse un oiseau s'envoler par un grand vent ou dans le courant d'air d'un puissant ventilateur, soit qu'on le lance avec une certaine vitesse en air calme, on sait (§ 158) que l'aile trouve, dans ces conditions, un appui plus solide. En effet, dans son abaissement, l'aile rencontre à chaque instant des masses d'air nouvelles qui n'ont encore subi aucun déplacement vertical et qui, pour cette raison, présentent à son choc leur résistance d'inertie.

Or ces conditions se rencontrent dans deux cas : soit quand l'oiseau, dépourvu de vitesse, est orienté contre un vent plus ou moins rapide, soit lorsque, dans l'air calme, il est animé de vitesse et par conséquent se trouve plongé dans un *vent relatif* pareil à celui que l'on sent, quand on passe la tête par la portière d'un vagon en marche.

L'oiseau rameur utilise sans cesse le vent. Il recherche le vent *absolu* pour s'envoler ou pour atterrir, et dans ces deux cas, s'oriente du côté d'où vient le souffle de l'air (§ 27). Il utilise aussi le vent *relatif* dans maintes circonstances : en plein vol, il s'en sert pour la relevée de ses ailes, ou bien, s'il a acquis une vitesse suffisante, il se laisse glisser sans coups d'ailes et dépense sa force vive à se soutenir sur l'air.

Les mêmes actes s'observent donc, d'une manière intermittente, dans le *vol ramé*, et d'une manière continue dans *le vol sans coups d'aile*. Il sera question, au chapitre prochain, de ce genre de vol ; nous en pouvons maintenant chercher l'explication mécanique.

§ 173. **Du vol sans coups d'ailes.** — Les plus anciens observateurs entrevoyaient la théorie mécanique du vol ramé, puisque, depuis Aristote, on rencontre cette explication : que l'oiseau se soutient et se propulse en refoulant l'air en bas et en arrière. Mais, pour ceux qui voyaient les oiseaux se soutenir sans battements d'ailes, il fallut d'autres explications. On les cher-

cha d'abord dans une mystérieuse propriété des êtres vivants.

Ainsi Galien, qui le premier a indiqué le vol sans coups d'ailes, supposait que le poids du corps était neutralisé par une *tension psychique*. Bélon prétendait expliquer ce genre de vol par *la répugnance de l'air à la légèreté de la plume*. Aldrovande, voyant l'Aigle planer, les ailes étendues et immobiles, attribuait à celles-ci un *mouvement tonique*, en lutte contre la pesanteur.

Toutes ces tentatives d'explication ne satisfaisaient personne ; ceux qui n'avaient pas vu l'Aigle ou le Vautour voler à voile se bornaient à nier l'existence de ce genre de vol; ceux qui l'avaient vu supposaient qu'il se produisait, dans les plumes de l'oiseau, quelque mouvement que l'œil ne peut apercevoir : comme si des mouvements insaisissables à la vue pouvaient trouver sur l'air une résistance efficace.

L'invention des aérostats fit croire, un moment, qu'on avait l'explication du vol sans coups d'ailes; on supposa que l'oiseau, rendu plus léger que l'air, s'élevait sans efforts à la façon d'un ballon.

On attribuait la cause de cette légèreté spécifique à l'échauffement et à la dilatation de l'air contenu dans les mailles du duvet, dans les tuyaux de ses plumes, dans ses sacs pulmonaires, dans ses os. Tout cet air, disait-on, soumis à la haute température du corps, s'allégeait comme l'air échauffé d'une montgolfière ; l'oiseau, plus léger que le milieu ambiant, s'y soutenait sans efforts. Quant aux battements du vol ramé, ils devaient avoir pour effet d'imprimer au vol des directions variées, et parfois de servir d'appoint à la force ascensionnelle, lorsqu'elle n'était pas suffisante.

Aujourd'hui que les changements de densité de l'air sont bien connus, on ne peut plus admettre cette théorie. En effet, la part réelle de l'allégement d'un oiseau par l'échauffement de l'air qu'il renferme, c'est-à-dire l'effet aérostatique de cet échauffement, est négligeable[1].

1. En admettant qu'un oiseau de 5 kilogrammes contienne dans les cavités de ses plumes et de ses organes intérieurs un litre d'air, ce qui est

En revanche, l'action mécanique de l'air contre le plan incliné de l'aile, ainsi que les effets de la pesanteur et de l'inertie de l'animal, paraissent suffire pour expliquer le mécanisme du vol sans coup d'aile, de même que ces actions ont expliqué déjà certains actes du vol ramé.

§ 174. **Identité des effets du vent dans tous les genres de vol.** — Dans le mécanisme du vol sans coups d'ailes, on retrouvera les mêmes effets du vent que dans le vol ramé. Les mêmes lois numériques président certainement au partage de la pression de l'air en deux composantes, dont l'une ou l'autre prédomine, suivant l'angle que la surface de l'aile forme avec la direction du vent. Plus on approfondit la nature des divers genres de vol, plus on voit combien ils se ressemblent en somme : on assiste même, quand on regarde certains oiseaux, au passage graduel d'une allure à l'autre, sans qu'on puisse saisir précisément l'instant où finit le vol ramé et où commence le vol à voile. Quand un Goéland, par exemple, monte en battant des ailes vers les régions où souffle le vent, on le voit d'abord décrire des orbes dans lesquels une partie du trajet circulaire est parcourue sans battements et l'autre avec des battements d'ailes. Ceux-ci deviennent de plus en plus rares, à mesure que le vent devient plus fort, et finissent par disparaître tout à fait. L'action du vent qui, dans le vol ramé, ne soutenait l'oiseau que d'une manière discontinue et qui avait besoin d'être secondée par les battements des ailes, finit par devenir suffisante pour fournir tout le travail du vol.

Toutefois, malgré ces ressemblances, il est indispensable, pour la clarté du sujet, de distinguer le vol ramé du vol sans coup d'ailes ; bien plus, il me paraît nécessaire de scinder le vol sans coups d'ailes en deux sous-genres distincts : le *vol plané* et le *vol à voile*.

exagéré ; que cet air atteigne la température de l'oiseau, c'est-à-dire 40°, tandis que l'air ambiant serait au-dessous de zéro, de manière à créer un écart de 50° entre la température intérieure et extérieure, l'oiseau ne serait allégé que d'environ 20 centigrammes.

§ 175. Il est utile de distinguer le vol plané du vol à voile. — D'Esterno a fort bien montré que si l'on a longtemps nié l'existence du vol à voile, c'est-à-dire du vol par la seule action du vent, cela tient à ce qu'on a confondu ce genre de vol avec le planement ou glissement sur l'air.

Le planement est un acte *temporaire*, qui peut se produire même par un temps calme ; le vol à voile peut être *continu*, mais exige pour se produire l'existence d'un vent plus ou moins fort (§ 9). Le planement s'observe chez tous les oiseaux ; le vol à voile n'appartient qu'à certaines espèces assez rares dans nos pays. Enfin, le planement se produit avec le *vent relatif*, le vol à voile avec le *vent absolu*.

A ces titres divers, il y a lieu de distinguer le vol plané du vol à voile ; le premier, de beaucoup le plus simple et le mieux connu, nous occupera tout d'abord.

§ 176. Le mécanisme du cerf-volant éclaire celui du vol sans coups d'ailes. — On peut enlever un cerf-volant dans deux conditions bien différentes : soit quand le vent souffle avec force, soit dans un air tout à fait calme. Dans le premier cas, il suffit d'attacher la corde à un piquet fiché en terre ; le cerf-volant s'élève et est soutenu à une certaine hauteur où il reste fixe quand la brise souffle avec égalité. En air calme, le cerf-volant s'élève aussi, quand un coureur, l'entraînant par sa corde, crée un vent relatif sous l'appareil.

Dans ces deux cas, si le cerf-volant se maintient à une hauteur constante, c'est que l'une des résultantes de la pression de l'air, celle qui s'exerce contre la pesanteur, est précisément égale au poids de l'appareil, tandis que la résultante horizontale est neutralisée par la traction de la corde.

Mais avant d'atteindre cet état d'équilibre, et tant qu'il s'élève du sol, le cerf-volant éprouve, de la part de l'air, des pressions incessamment changeantes, suivant l'angle sous lequel il présente sa surface à l'action du vent. Au début, quand le plan frappé par l'air est à peu près vertical, l'effet du vent s'exerce presque tout entier horizontalement, et la corde est fortement

tendue, tandis que la composante verticale suffit à peine à soulever l'appareil[1]. A mesure qu'il s'élève, le cerf-volant fait un angle plus petit avec la direction du vent; il tire de moins en moins sur la corde, jusqu'au moment où il atteint sa hauteur maxima. Que le vent souffle avec plus de force, ou que le coureur accélère sa vitesse, le cerf-volant montera encore plus haut; il s'abaissera, au contraire, si la vitesse relative de l'air diminue. Enfin, à vitesse égale de l'air, les forces qui agissent sur le cerf volant auront des valeurs différentes suivant la manière dont sera attachée la corde, car l'angle sous lequel la surface se présentera au vent variera avec ce mode d'attache.

Ainsi, la vitesse de l'air par rapport à la surface qu'il rencontre, l'angle que fait cette surface avec la direction du vent relatif, telles sont les conditions qui interviennent pour faire varier l'action des forces, horizontale et verticale, sur un cerf-volant. Les mêmes influences agissent sur les ailes de l'oiseau, quand il les tient déployées, soit qu'il se lance avec vitesse dans un air calme, soit que, immobile par rapport au sol, il présente ses ailes au souffle du vent. Dans les deux cas, les composantes de la pression de l'air agiront sur la masse de l'oiseau comme sur celle du cerf-volant : l'une verticalement contre la pesanteur, l'autre horizontalement. Et comme aucun lien matériel ne résiste à cette dernière force, elle agira sur la masse du corps, pour en modifier la vitesse.

§ 177. **Moyen d'analyser avec précision les différents actes du vol sans coups d'ailes.** — L'absence de données précises sur les différents actes du vol sans coups d'ailes est la cause principale pour laquelle ce genre de vol est encore incomplètement expliqué. On a vu au chap. I, § 18, que l'observation des oiseaux est insuffisante puisque, dans le même acte, le vol par orbes circulaires, divers observateurs disent avoir vu des choses bien différentes. Pour les uns, l'oiseau s'élève dans la partie du cercle

1. On a vu § 139 comment la résistance de l'air se partage proportionnellement au sinus et au cosinus de l'angle que forme un plan incliné avec la direction du vent.

qu'il parcourt contre le vent, tandis que d'autres ont cru le voir descendre dans ce cas et monter, au contraire, lorsqu'il cède au vent.

Il ne saurait être impossible de déterminer exactement ce qui se passe dans ces circonstances. Ce problème est identique à celui que les géomètres résolvent à chaque instant, lorsqu'ils ont à mesurer la hauteur ou la distance d'un point inaccessible. Or, quand on sait déterminer la position qu'occupe, dans l'espace, le coq immobile qui surmonte un clocher, il suffit d'appliquer la même méthode un certain nombre de fois, pour déterminer la série des positions qu'occupe, à des instants successifs, un oiseau qui plane ou qui vole à voile. Toute la difficulté consiste à réaliser en un temps très court chacune de ces déterminations géométriques, afin de pouvoir les répéter à courts intervalles de temps.

Voici la méthode que j'ai proposée autrefois, mais que les circonstances ne m'ont pas encore permis de mettre en pratique :

« Dans un lieu où des oiseaux se livrent au vol à voile, supposons deux observateurs séparés l'un de l'autre par une distance connue. Chacun d'eux est muni d'une chambre noire sur le verre de laquelle l'oiseau peint son image qui se déplace en sens divers. Chaque observateur tient à la main un style électrique dont la pointe écrivante est actionnée à des intervalles de temps égaux, par les clôtures et ruptures alternatives d'un circuit commun. A un moment donné, chacun des observateurs commencera à suivre le mouvement de l'image de l'oiseau sur le verre, avec la pointe de son style ; à un autre moment, tous deux cesseront de tracer.

« A la fin de l'expérience, les deux glaces porteront des images, formées de courbes ponctuées dans chacune desquelles l'écartement des points sera plus ou moins grand, suivant la vitesse ou la direction du vol. En combinant ces images prises de points de vue différents, on pourra construire géométriquement la trajectoire de l'oiseau, suivant les trois dimensions de l'espace. Sur cette figure en relief supposée construite, l'écartement des

points exprimera les différentes valeurs de la vitesse de l'oiseau aux divers instants de son parcours. »

On n'aura ainsi que la trajectoire de l'oiseau, et sa vitesse aux différents points de son parcours. Pour connaître les attitudes qu'il présente en ces points, il faudra recourir à la photographie ; quelques images instantanées achèveraient de donner les renseignements nécessaires. Et puisqu'il ne s'agira plus de saisir des actes rapides, comme dans le vol ramé, on pourra employer un objectif à long foyer, donnant de grandes images sur lesquelles on appréciera avec facilité les changements d'attitude de l'oiseau.

CHAPITRE XIX

DU VOL PLANÉ

Définition du vol plané; son analogie avec le mécanisme du cerf-volant. — Circonstances dans lesquelles s'observe le vol plané. — Rapport de la hauteur perdue à la longueur horizontalement parcourue, dans le planement. — Influence que l'inclinaison de la surface des ailes sur l'horizon exerce sur la direction de la trajectoire. — Difficulté de résoudre, par le calcul seul, le problème du vol plané de l'oiseau. — Imitation du planement de l'oiseau, au moyen d'appareils mécaniques. — Emploi de la photochronographie, pour suivre les évolutions des appareils planeurs. — Position du centre de pression de l'air sous les ailes, dans le vol plané; loi d'Avanzini. — Plus le centre de gravité est porté en avant, plus l'oiseau plane avec vitesse. — Mouvements ondulatoires de certains appareils planeurs; leur explication.

§ 178. **Définition du vol plané; son analogie avec le mécanisme du cerf-volant.** — Le vol plané, d'après d'Esterno, est un glissement sur l'air, pouvant se produire en l'absence du vent. Cet acte, éminemment temporaire, n'exige de l'oiseau qu'une certaine vitesse. Quel que soit le moyen par lequel cette vitesse aura été préalablement obtenue, elle se dépensera peu à peu dans le planement et servira à soutenir l'oiseau contre la pesanteur. Toutefois, dans le planement descendant, la pesanteur entretiendra la vitesse de l'oiseau, et cette vitesse pourra demeurer constante pendant toute la durée du vol.

D'Esterno[1], Liais[2] et tous ceux qui, plus récemment, se sont occupés de locomotion aérienne, comparent le vol plané au mécanisme du cerf-volant.

1. D'Esterno, *loc. cit.*, p. 74.
2. Liais, *C. R. de l'Académie des sciences*, t. LIX, p. 907, 1864.

Une vitesse acquise est la condition préalable du vol plané; on peut s'en convaincre, en examinant les diverses circonstances dans lesquelles ce vol se produit.

§ 179. **Circonstances dans lesquelles s'observe le vol plané.** — Quand un oiseau a donné des coups d'ailes pendant un certain temps, il peut suspendre un instant ses battements et continuer à glisser sur l'air; d'autres fois, on le voit se laisser tomber d'un lieu élevé, puis, quand il a acquis une vitesse suffisante, ouvrir les ailes et s'avancer en planant. La force vive acquise dans la chute entraîne l'oiseau, comme la corde que l'on tire entraîne le cerf-volant.

Des temps de planement, interrompant le rythme régulier du vol ramé, s'observent très souvent sur les Hérons, les Cigognes, les Buses, les Goélands, en somme sur tous les oiseaux pourvus d'ailes étendues. C'est à ce genre de vol que Liais faisait allusion lorsqu'il écrivait en 1861 : « Dans ce vol, l'oiseau s'élève sur l'air en perdant de la vitesse acquise par les coups d'ailes ; ses ailes sont obliques en bas et en arrière[1]. » L'œil n'aperçoit pas toujours la perte de hauteur dont l'existence est théoriquement admise pendant le planement. Du reste, cette perte de hauteur n'est pas obligée ; l'observation montre que l'oiseau peut, non seulement planer sans descendre, mais, au besoin, gagner de la hauteur, à la condition de perdre une plus grande partie de sa vitesse. La manœuvre du Faucon décrite sous le nom de *pointe* (§ 4) et dans laquelle l'oiseau chasseur *trousse* sa proie est un *planement ascendant*. Cet acte ne se produit utilement que si l'oiseau chasseur a gagné du chemin sur l'oiseau chassé, et s'il se trouve au-dessous, mais en avant de lui. La pointe a pour effet de faire gagner au Faucon de la hauteur, de sorte qu'il atteigne sa proie par-dessous.

L'autre genre de planement est celui dans lequel l'oiseau, ayant acquis de la vitesse en se laissant tomber d'un lieu élevé, utilise sa force vive pour se transporter, sans coups d'ailes, à

1. Liais, *C. R. de l'Académie des sciences*, t. LII, p. 696, 1861.

une certaine distance, ou pour remonter à une certaine hauteur; ce genre de vol s'observe fréquemment.

Quand un Pigeon, perché sur le bord d'un toit, veut descendre à terre, il le fait en planant. Toutefois, les manœuvres de l'oiseau sont différentes, suivant que le point où il se propose d'atterrir est placé verticalement au-dessous du point de départ, ou plus ou moins éloigné de cette verticale.

Dans le premier cas, le Pigeon peut descendre verticalement en déployant les ailes et la queue, de manière à prendre un triple appui sur l'air. Mais alors la vitesse de chute est excessive, et l'oiseau, un peu avant d'atterrir, doit éteindre cet excès de vitesse au moyen de coups d'ailes d'arrêt. Parfois, pour atteindre son but avec moins de vitesse de chute, le Pigeon décrit des orbes descendants dont le rayon est d'autant plus grand que l'arrivée sur le sol devra être plus retardée.

Si, au contraire, le point d'arrivée est, dans le sens horizontal, assez éloigné du point du départ, l'oiseau y atteindra, soit en se laissant glisser suivant une ligne inclinée, soit en donnant de rares coups d'ailes si la vitesse que la pesanteur lui communique est insuffisante pour le porter jusqu'à son but, par simple glissement sur l'air.

Ici vient se placer une question importante : Quelle est la plus grande distance horizontale qu'un oiseau puisse parcourir, en se laissant glisser d'une hauteur donnée?

§ **180. Rapport de la hauteur perdue à la longueur horizontalement parcourue, dans le planement descendant.** — D'Esterno[1] croit avoir observé que la distance parcourue par l'oiseau, dans le sens horizontal, peut atteindre huit fois la hauteur perdue. A ce compte, la trajectoire de l'oiseau ferait avec l'horizon un angle de 7 degrés.

Pour Mouillard[2], l'oiseau qui glisse sur l'air descendrait sous un angle de 10° et parcourrait horizontalement 5 mètres, pour chaque mètre de hauteur perdue.

1. D'Esterno, *loc. cit.*, p. 81.
2. Mouillard, *loc. cit.*, p. 218.

D'autre part, Tatin[1], faisant des expériences sur des appareils planeurs dont il sera question plus loin, a trouvé que le rapport de 1 mètre de chute, pour 8 mètres de parcours horizontal, est la pente la plus faible qu'on puisse obtenir.

Enfin, dans un remarquable mémoire qu'il vient de publier, Bretonnière admet, d'après ses observations sur les Cigognes, que l'angle le plus faible sous lequel le planement puisse avoir lieu est de 10°. Cette évaluation est basée sur des mesures très précises, l'auteur ayant relevé avec soin les niveaux et les distances relatives des points de départ et d'arrivée des oiseaux[2].

Il y a quelques observations à faire, relativement à l'estimation de l'angle que la trajectoire de l'oiseau planeur fait avec l'horizon. Cette trajectoire n'est pas une ligne droite sur tout son parcours; elle représente une courbe d'apparence parabolique, presque verticale à son origine, mais atteignant peu à peu une inclinaison minima qu'elle conserve jusqu'à la fin. Ce n'est qu'en tirant une ligne imaginaire, entre le point de départ et le point d'atterrissage, que l'on obtiendrait une pente régulière exprimant l'inclinaison moyenne de la trajectoire du planement. Or, l'oiseau ménage-t-il toujours les effets de la pesanteur, de manière à réduire au minimum la résistance de l'air à sa translation horizontale, et arrive-t-il sans vitesse au terme de sa course, de sorte que le planement sous un angle de 10°

1. Tatin, *Travaux du laboratoire de M. Marey*, année 1876, p. 108.

2. J'extrais du mémoire de Bretonnière les lignes suivantes qui montrent avec quelle précision l'auteur a mesuré l'inclinaison de la trajectoire de l'oiseau sur l'horizon : « Du haut du rocher élevé sur lequel est construite la ville de Constantine, nous avons vu souvent des Cigognes descendre rapidement en glissant sur l'air, suivant des trajectoires représentées par des lignes droites de plus d'un kilomètre de longueur. La vitesse de l'oiseau et l'inclinaison de sa trajectoire ne nous ont point paru, dans ces nombreuses observations, présenter des différences sensibles. Nous avons essayé d'apprécier l'une et l'autre à l'aide des distances et des différences de niveau de repères voisins des points de passage de la Cigogne. Nous avons estimé à 20 mètres la vitesse de l'oiseau et de 15 à 20 p. 100, soit en moyenne 17,5 p. 100, la pente de sa trajectoire, pente correspondant à un angle de 10° avec l'horizon (Bretonnière, *Études sur le vol plané*, l'Aéronaute, juillet 1889).

corresponde à la meilleure utilisation des effets de la pesanteur, pour produire un certain parcours horizontal? Rien ne le prouve.

Les calculs de Bretonnière ne portent que sur la partie rectiligne de la trajectoire de la Cigogne; il élimine donc la phase parabolique où la pesanteur fait descendre l'oiseau, d'abord d'un mouvement vertical et accéléré, puis obliquement, avec une vitesse de chute diminuée. Il ne considère le mouvement que lorsque celui-ci a acquis son uniformité dans les deux sens, c'est-à-dire quand l'oiseau se transporte, avec une vitesse constante, sous un angle constant avec l'horizon.

Comme base de ses calculs, Bretonnière prend le résultat de ses propres mesures, à savoir : que la trajectoire de la Cigogne est inclinée de 10° au-dessous de l'horizon, et que la vitesse de l'oiseau

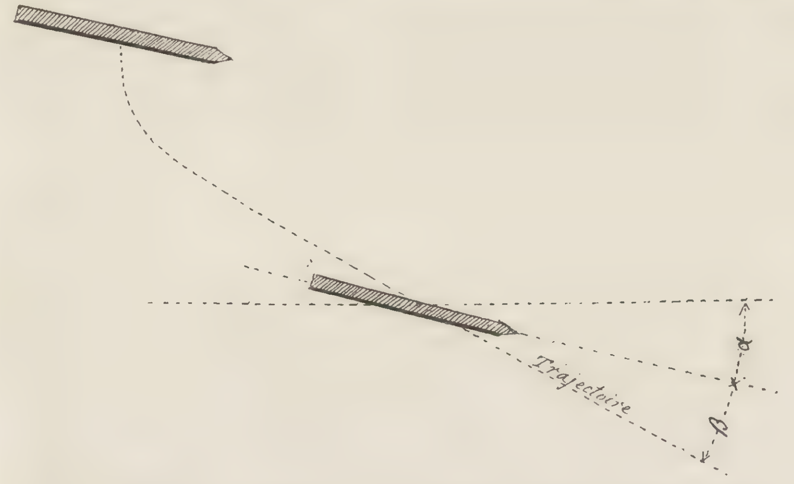


Fig. 152. — Trajectoire d'un aéroplane ou d'un oiseau planeur. Angle α que forme la direction de la surface des ailes avec l'horizon. Angle β formé par la direction de la trajectoire avec la surface des ailes. α + β angle que fait la trajectoire avec l'horizon (d'après Bretonnière).

sur sa trajectoire est en moyenne de 20 mètres par seconde. Prenant alors les formules de Hutton relatives à la résistance de l'air aux plans obliques, l'auteur conclut que l'inclinaison des ailes de la Cigogne avec sa trajectoire, c'est-à-dire l'angle β doit être de 5° 23′ 11″; que l'inclinaison de la trajectoire au-dessous de

l'horizon (angle α) doit être de 5°; la somme de ces deux angles 10° 23′ 11″ représente très sensiblement les *dix degrés* que l'expérience a assignés comme inclinaison de la trajectoire de l'oiseau sur l'horizon.

§ 181. **Influence que l'inclinaison de la surface des ailes sur l'horizon exerce sur la direction de la trajectoire.** — Si le lecteur se reporte au chapitre XVII, il y verra que, suivant l'angle que forme l'aile remontante avec l'horizon, les valeurs, absolue et relative, des deux composantes de la résistance de l'air changent beaucoup; les choses se passent de même dans le planement. En orientant ses ailes sous un angle très ouvert, un oiseau animé d'une translation rapide pourra s'élever beaucoup, mais en sacrifiant beaucoup de sa vitesse acquise. Avec un angle très aigu, il perdra peu de sa vitesse, mais s'élèvera peu ou même descendra. Il ne semble donc pas qu'on doive attribuer à la trajectoire du vol plané une inclinaison constante sur l'horizon. Tout au plus pourrait-on assigner à cette inclinaison une valeur minimum correspondant à la meilleure utilisation de la pesanteur pour produire de la translation, et cette inclinaison serait voisine de 10°.

Mais l'oiseau peut à volonté donner à sa trajectoire toutes les inclinaisons possibles. Celle-ci pourra être presque verticalement ascendante comme dans la *ressource;* sensiblement horizontale, ainsi que cela semble avoir lieu dans les temps de planement qui interrompent parfois le vol ramé[1]; enfin oblique, descendant sous un angle plus ou moins aigu avec l'horizon, comme quand l'oiseau se laisse glisser d'un lieu élevé.

On va voir que ces changements d'inclinaison de l'aile s'obtiennent par des déplacements du centre de gravité de l'oiseau.

§ 182. **Difficulté de résoudre, par le calcul seul, le problème du vol plané.** — Il semble bien hasardeux, connaissant l'inclinaison de la trajectoire d'un oiseau planeur, la vitesse de son

1. Si les temps de planement se font sur une trajectoire horizontale, il faut admettre que l'angle de l'aile avec l'horizon s'ouvre de plus en plus, à mesure que la vitesse acquise de l'oiseau diminue (§ 167).

vol et la surface de ses ailes, d'en conclure à l'inclinaison des ailes sur l'horizon. C'est assimiler à un plan mince des surfaces courbes et flexibles dont la forme, incessamment changeante, doit agir sur l'air d'une façon toute spéciale.

On se souvient des expériences de Müller (§ 159); elles ont montré que le relief du bord antérieur de l'aile force l'air comprimé sous sa face inférieure à s'échapper tangentiellement à la surface de l'aile. Quoique l'aile des oiseaux voiliers soit plus plate que celle des rameurs, le relief du bord antérieur n'y est pas nul; si donc un jet d'air comprimé s'échappe le long du bord postérieur de l'aile, il s'ensuivra une réaction qui poussera l'oiseau presque directement suivant le plan de son aile. Cet effet ne se produirait pas de la même façon avec des surfaces planes et rigides.

Mais si le calcul est insuffisant à faire prévoir tout ce qui se passe dans le vol ramé, l'expérience promet à cet égard d'utiles renseignements. D'une part, on peut espérer que les méthodes géométriques et photographiques nous renseigneront plus complètement sur les manœuvres des oiseaux planeurs; d'autre part, on peut profiter, dès à présent, de certaines expériences fort intéressantes qui ont été faites au moyen d'appareils planeurs en forme de cerf-volant, construits avec des surfaces minces, bien tendues et diversement inclinées sur l'air. Cayley[1] en Angleterre, J. Pline[2] en France ont fait, à cet égard, des expériences très concluantes.

§ 183. **Imitation du planement de l'oiseau au moyen d'appareils mécaniques.** — Pour simplifier les conditions du phénomène, on peut, dans la construction des appareils planeurs, s'écarter des formes de l'oiseau et adopter des formes géométriques plus simples.

Une feuille de papier, de forme carrée, est pliée par le milieu de manière à former un angle dièdre (fig. 153, moitié gauche), dans le fond duquel on fixe, avec un peu de cire, une tige de métal terminée, à son extrémité, par deux petites masses de

1. Cayley (traduction dans l'*Aéronaute*, 1876-77).
2. J. Pline (communications orales, 1868).

même poids; on réalise ainsi un système équilibré et stable dans l'air. Si le centre de gravité passe exactement par le centre de figure, en abandonnant l'appareil à la pesanteur, on le verra tomber verticalement, la convexité de son angle dièdre dirigée vers le bas.

Mais si l'on enlève une des masses, de manière à rejeter le centre de gravité vers l'une des extrémités de l'arrête du dièdre (fig. 153, moitié droite), l'appareil suivra une direction oblique,

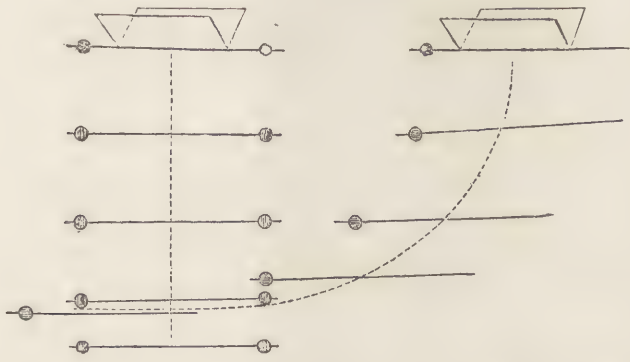


Fig. 153. — Appareils planeurs. L'un (moitié gauche de la figure) est équilibré et descend verticalement; l'autre (moitié droite) a son centre de gravité près d'une de ses extrémités et glisse de ce côté. Dans les deux cas, la trajectoire est indiquée par une ligne ponctuée.

et glissera sur l'air, d'un mouvement accéléré, en se transportant du côté où son centre de gravité est placé.

La trajectoire parcourue par ce mobile est verticale si les deux moitiés sont bien symétriques; dans le cas contraire, elle s'infléchit du côté où la translation dans l'air trouve le plus de résistance. Ces effets sont entièrement comparables à ceux du gouvernail sur la direction d'un navire; ils peuvent aussi se produire dans le sens vertical. En effet, dans notre petit appareil, relevons le bord postérieur des plans latéraux (fig. 154); à un moment donné de sa chute oblique, l'appareil remontera contre la pesanteur, mais perdra en même temps sa vitesse de translation. Voici ce qui s'est passé : tant que le mobile, dans sa chute, n'a eu que peu de vitesse, l'influence de sa courbure est restée insensible, mais quand la vitesse a été assez grande, un effet de gouvernail

s'est produit qui a relevé l'extrémité antérieure du mobile et lui a imprimé une direction ascendante. A partir de ce moment,

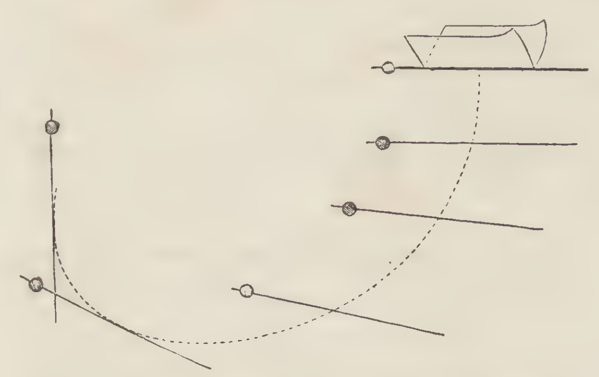


Fig. 154. — Appareil planeur, avec effet de gouvernail ascendant.

la pesanteur, qui était la force accélératrice du glissement de l'appareil dans l'air, est devenue retardatrice : le planeur, s'élevant d'un mouvement diminué, est arrivé à l'immobilité. Si nous suivions plus longtemps l'expérience, nous verrions une nouvelle descente se produire; une série d'oscillations de ce genre s'observe parfois, avant que le mobile tombe sur le sol.

Fig. 155. — Appareil planeur, avec effet de gouvernail descendant.

Enfin, si l'on donne à la courbure du papier une forme concave par en bas (fig. 155), on voit, à un certain moment de sa descente oblique, le mobile infléchir brusquement sa trajectoire en bas et frapper le sol avec violence. Dans ce cas, au moment où l'effet de gouvernail s'est produit, la direction nouvelle s'est trouvée favorisée par la pesanteur, qui a précipité la chute, tandis que tout à l'heure elle ralentissait la remontée.

Ces évolutions du petit appareil en papier ne ressemblent-elles pas à celles des oiseaux? Et si l'appareil était capable, à un moment donné de sa trajectoire dans l'air, de modifier spontanément la courbure de ses surfaces, ne le verrait-on pas effectuer des *plongées* ou des *ressources* pareilles à celles qu'Hubert a décrites dans le vol du Faucon?

On a construit des planeurs de diverses formes et de tailles différentes. Cayley en décrit un qu'il nomme *aéroplane* et qui, lesté d'un poids de 200 livres, descendit du haut d'une colline dans la plaine, sous un angle de 10° avec l'horizon. J. Pline, il y a une vingtaine d'années, construisit des appareils d'une légèreté extrême; il leur donnait à peu près la forme d'oiseaux ou de papillons et, moyennant de légers déplacements du centre de gravité ou de légères torsions de la surface des ailes, il leur faisait faire des parcours lents ou rapides, uniformes ou saccadés, rectilignes ou infléchis en divers sens.

L'extrême légèreté de ces petits objets donne à leurs mouvements une grande lenteur, car la pesanteur qui représente la force motrice est très faible en comparaison de la résistance de l'air. Cependant, malgré cette lenteur, l'œil est encore incapable de suivre exactement tous les détails du phénomène, d'apprécier toutes les inflexions de la trajectoire, toutes les accélérations et les ralentissements du mouvement; or, c'est là ce qu'il faudrait connaître, pour comprendre réellement le mécanisme du vol plané. Les méthodes basées sur l'emploi de la photographie analysent les évolutions des appareils planeurs avec toute la précision désirable.

§ 184. **Emploi de la photochronographie pour suivre les évolutions des appareils planeurs.** — On fait tomber un des appareils de J. Pline[1] devant un fond obscur sur lequel un

1. Sous la forme véritable que J. Pline leur a donnée, les appareils planeurs présentent l'aspect représenté fig. 156. Deux ailes symétriques, taillées d'un seul coup de ciseaux dans une feuille de papier pliée en deux, sont prolongées, en arrière, par une sorte de queue taillée de la même façon. Le tout forme un angle dièdre ouvert en haut et dans le fond duquel on

réseau de fils, croisés à angle droit, forme une échelle graduée pour mesurer les déplacements horizontaux et les déplacements



Fig. 156. — Appareil planeur en papier construit suivant le procédé de J. Pline.

verticaux du mobile. L'écartement de ces lignes est de 10 centimètres en tous sens.

loge une paille ou même une aiguille d'acier terminée à l'une de ses extrémités par une boule de cire. Ce petit lest peut glisser le long de la tige, de manière à porter le centre de gravité du système plus ou moins loin en avant des ailes. La queue peut, de son côté, être modifiée dans sa forme, étalée horizontalement ou infléchie, soit en haut soit en bas, de manière à produire les effets d'un gouvernail. Enfin, les ailes peuvent également être courbées de diverses façons, afin de se présenter sous des angles variables. Tous ces changements modifient la trajectoire parcourue.

La symétrie parfaite des deux moitiés de l'appareil planeur est indispensable, si l'on veut que la trajectoire ne dévie ni à droite ni à gauche, quelles que soient d'ailleurs les sinuosités qu'elle présente dans le plan du mouvement. Si l'on tord légèrement l'une des ailes, de telle sorte que sa projection normale à l'axe du vol ait un peu plus de surface que celle de l'aile opposée, aussitôt on voit la trajectoire du planeur s'infléchir du côté où l'aile présente le plus de résistance. Cette petite expérience justifie complètement l'opinion des anciens auteurs (§ 24) sur l'effet du changement d'inclinaison de l'une des ailes, dans les mouvements tournants de l'oiseau.

Le mobile, qui était suspendu par l'anse de fil adaptée à sa queue, tombe d'abord presque verticalement et d'un mouvement accéléré ; bientôt, par l'effet de gouvernail que produit la queue de l'appareil légèrement courbée vers le haut, la trajectoire s'infléchit, le plan des ailes se couche presque horizontalement sur

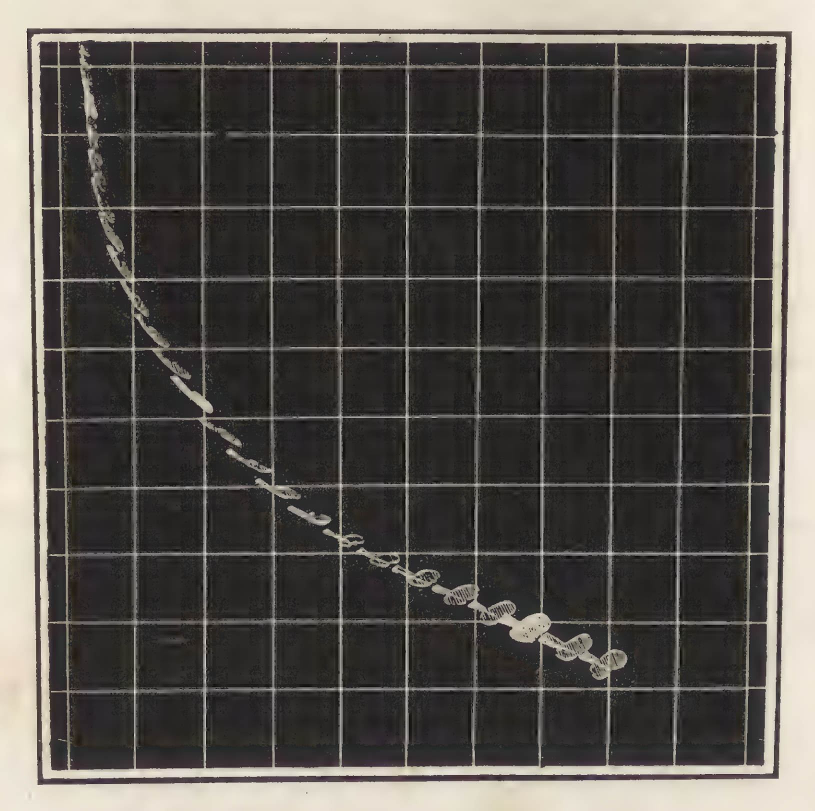


Fig. 157. — Photochronographie de la trajectoire d'un appareil planeur.

l'air, et la translation suit une direction voisine de l'horizontalité. Dans la figure 157, une légère dissymétrie de l'appareil lui a imprimé un mouvement de côté, par suite duquel il tourne un peu sa face inférieure vers l'observateur.

Un ingénieux constructeur, M. Bègue, a réalisé, il y a quelques années, un jouet fort amusant avec des appareils planeurs en

papier. Ces objets avaient des formes variées; celle d'une Chauve-souris était particulièrement curieuse. On plaçait le planeur sur une sorte d'écran ou d'éventail qui servait à le lancer; arrivé à une certaine distance, l'appareil se retournait et revenait vers son point de départ. Avec un peu d'exercice, on arrivait à recevoir le planeur sur l'éventail lui-même et à le lancer indéfiniment.

§ 185. **Position du centre de pression de l'air sous les ailes, dans le vol plané; lois d'Avanzini.** — Quand un oiseau tient les ailes horizontalement étendues et se laisse descendre suivant une ligne verticale, le centre de pression de l'air sous chacune des ailes coïncide avec leur centre de figure. Mais il n'en est plus de même quand l'oiseau se déplace obliquement avec une grande vitesse; le centre de pression de l'air se rapproche alors du bord antérieur de l'aile, d'autant plus près de ce bord, que la translation est plus rapide et que la surface de l'aile fait avec l'axe du vol un angle plus aigu. Ce déplacement du centre de pression a été découvert par Avanzini, dans ses expériences sur la résistance que l'eau présente au mouvement de surfaces diversement inclinées[1].

De Louvrié admet qu'une action semblable doit se produire quand une surface inclinée se déplace dans l'air. Et en effet, on a observé qu'un oiseau qui plane avec une grande vitesse porte ses ailes en arrière. Or, puisqu'il n'y a pas alors rupture d'équilibre et culbute en avant, il faut admettre que la résistance de l'air n'a pas sa résultante au centre de la surface de l'aile, mais près du bord antérieur de celle-ci.

1. D'après Avanzini (*Istituto nazionale Italiano*, t. I, part. I), il y a coïncidence parfaite du centre de pression avec le centre de la surface, quand celle-ci se déplace normalement à son plan; mais la coïncidence cesse quand le plan est oblique par rapport à la direction de son mouvement. Le centre de pression se rapproche alors du bord antérieur du plan, et cela d'autant plus que l'incidence du plan est plus oblique et sa vitesse plus grande. Cayley (*l'Aéronaute*, 1877, p. 260) indique ce déplacement du centre de pression de l'air sous les ailes de l'oiseau, quand celles-ci forment un angle très aigu avec la trajectoire.

D'autre part, les observations de Mouillard[1] nous apprennent que la direction des ailes change suivant la rapidité plus ou moins grande du planement. Chez les oiseaux qui planent avec

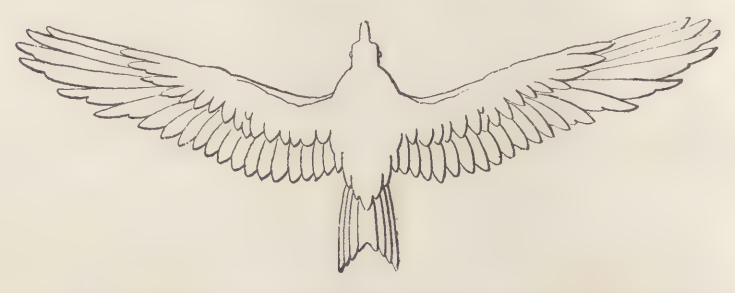


Fig. 158. — Aspect d'un oiseau qui plane lentement; la pointe des ailes est portée en avant (Mouillard).

une grande lenteur, les ailes sont portées en avant et forment entre elles un angle rentrant au fond duquel se voit la tête (fig. 158). D'autres oiseaux, à planement plus rapide, portent

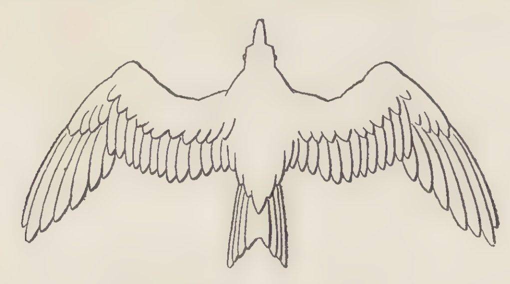


Fig. 159. — Aspect d'un oiseau qui glisse rapidement sur l'air; la pointe des ailes est portée en arrière (Mouillard).

leurs ailes en arrière, de manière à former en avant un angle saillant (fig. 159).

Le déplacement du centre de pression sous l'aile, pendant la translation rapide, tend, avons-nous dit, à détruire l'équilibre de l'oiseau dans l'air. Mais cet équilibre se rétablit par différentes manœuvres: soit par l'action de la queue agissant à

1. Mouillard, *loc. cit.*, p. 227.

la façon d'un gouvernail, dans le sens vertical; soit par le déplacement de l'aile en arrière, ainsi qu'on vient d'en voir des exemples; soit enfin, chez certaines espèces, par l'allongement du cou. Le Héron, dans le vol ordinaire, tient le cou replié et la tête entre les épaules; s'il est poursuivi par quelque oiseau de proie, il allonge le cou et gagne de la vitesse.

§ 186. **Plus le centre de gravité est porté en avant, plus l'oiseau plane avec vitesse.** — Cette sorte d'aphorisme s'appuie, non seulement sur l'observation des oiseaux, mais sur le résultat des expériences faites avec les appareils planeurs ci-dessus décrits. Dans la construction ordinaire de ces appareils, on se sert, comme lest, d'une boule de cire traversée par une aiguille le long de laquelle on peut la faire glisser. Suivant que la boule de cire est portée en avant ou en arrière, le centre de gravité de l'appareil tout entier subit des déplacements de même sens. Or, jusqu'à une limite qu'il sera intéressant de préciser, plus on porte en avant le centre de gravité du planeur, plus sa trajectoire est voisine de l'horizontalité. L'explication de ce fait semble être la suivante : le déplacement du centre de gravité de l'appareil en avant est nécessaire, afin de conserver l'équilibre pendant le planement rapide, malgré le déplacement en avant qu'éprouve alors le point d'application de la résistance de l'air.

§ 187. **Mouvements ondulatoires de certains appareils planeurs; leur explication.** — Les petits planeurs en papier présentent parfois un phénomène très curieux qui semble produit par les déplacements du point d'application de la résistance de l'air, suivant les lois d'Avanzini. Quand ces appareils ont des ailes étroites, on les voit souvent prendre un mouvement de balancement, pendant leur translation horizontale, et progresser suivant une trajectoire onduleuse, alternativement ascendante et descendante. On voit aussi que la phase ascendante s'accompagne de ralentissement, la phase descendante, d'accélération; enfin que, pendant la montée comme pendant la descente, l'axe de l'appareil est incliné suivant la même direction que l'axe du vol.

Voici comment les lois d'Avanzini expliquent ce phénomène. L'appareil, bien entendu, est rigide et ne peut modifier l'inclinaison de ses ailes par rapport à l'axe du corps ; mais quand la chute a produit une accélération suffisante, la résistance de l'air, qui agissait d'abord au milieu de la surface des ailes, se porte au voisinage de leur bord antérieur. Le planeur déséquilibré tend à basculer en arrière et relève son avant. Alors l'inclinaison des ailes sur leur trajectoire présente la direction qui fait monter l'appareil contre la pesanteur ; cet appareil monte donc, mais en même temps il perd de sa vitesse par l'action retardatrice de la pesanteur. Or, par l'effet même de ce ralentissement, le centre de pression de l'air revient coïncider avec le centre de figure des ailes, l'équilibre est rompu en sens inverse, et l'appareil s'incline le bec en bas. Par le fait de cette orientation, le planeur suit une marche descendante que la pesanteur accélère. Dès que la vitesse aura atteint un degré suffisant, le point d'application de la résistance de l'air se portera de nouveau en avant et le planeur recommencera une ondulation ascendante[1].

1. Mouillard a été certainement témoin de ces phénomènes. Mais il les attribue (*loc. cit.*, p. 210) à un déplacement du centre de gravité des corps en mouvement. Ainsi, quand il décrit les tournoiements de sens constant qu'un rectangle de carton bristol exécute dans l'air, Mouillard admet sans preuves que, par l'effet de la translation du carton, le centre de gravité de celui-ci a dû se porter en arrière du centre de figure. Dès lors, l'arrière du carton devenu plus lourd s'abaisserait plus que l'avant et la rotation s'ensuivrait avec son sens défini. En appliquant la loi d'Avanzini, on doit expliquer rationnellement le même fait de la façon suivante : le centre de pression de l'air se portant en avant du centre de figure, l'arrière du carton bascule et commande ainsi le sens du mouvement giratoire.

CHAPITRE XX

DU VOL A VOILE

Définition du vol à voile; conditions nécessaires pour qu'il se produise. — Objections de certains mécaniciens à la possibilité du vol à voile. — Premiers essais d'une théorie du vol à voile. — Rôle de l'inertie de l'oiseau. — Influence des intermittences du vent. — Artifices de l'oiseau pour créer des intermittences du vent. — Mécanisme du vol par orbes. — Observations et calculs de Basté sur le vol à voile. — Plan d'expériences à faire, pour éclairer le mécanisme du vol à voile.

§ 188. **Définition du vol à voile; conditions nécessaires pour qu'il se produise.** — Le vol à voile a pour condition indispensable l'action du vent sous les ailes, de sorte que, par un calme absolu, les oiseaux voiliers eux-mêmes volent à rames ou ne volent pas.

Le vol à voile n'est possible qu'à certaines espèces qui présentent une conformation particulière; les mieux douées ont les ailes longues, plates et étroites. Les oiseaux qui présentent ce type n'ont pas besoin d'un grand vent pour voler à voile : ainsi, la Frégate et le Naucler, d'après Basté, volent à voile dans des pays où l'air est relativement calme. Dans les contrées où le vent est plus vif, on voit voler à voile des oiseaux moins bien pourvus de surfaces d'ailes : Mouettes, Goélands, Pétrels[1].

Mais la nécessité du vent s'impose absolument, et si parfois on

1. Basté, *Mémoire relatif au problème de la locomotion dans l'air* (*L'Aéronaute*, octobre 1872, p. 191), a cherché à déterminer la vitesse du vent nécessaire pour que le vol à voile soit possible aux diverses espèces. D'après cet auteur, par un vent de 2 à 5 mètres, on ne voit voler que les oiseaux ayant de 55 à 60 décimètres carrés de surface d'ailes par kilogramme de poids; par un vent de 9 à 12 mètres, des oiseaux de 30 à 35 décimètres carrés pratiquent aussi le vol à voile; par des tempêtes violentes, avec un vent de 20 à 25 mètres, le vol à voile est possible, même à des oiseaux de 28 à 30 décimètres carrés.

a cru voir des oiseaux voler à voile, par un calme plat, c'est que ce calme n'existait qu'au niveau du sol, tandis que le vent soufflait dans les régions élevées où se tenaient les oiseaux voiliers.

§ 189. **Objections de certains mécaniciens à la possibilité du vol à voile.** — Beaucoup de mécaniciens, n'ayant jamais eu l'occasion de voir un oiseau pratiquer le vol à voile, ont nié la possibilité de ce genre de vol qui leur semblait aussi absurde que le mouvement perpétuel. Le nom même de *vol à voile* a été considéré comme impliquant une assimilation erronée; un oiseau ne semblant pas réaliser les mêmes conditions mécaniques qu'un bateau à voile.

Ces objections semblent de peu de valeur et l'on peut, au contraire, trouver de grandes analogies entre une barque à voiles et un oiseau voilier. Mais il est nécessaire, dans cette comparaison, de considérer que la surface frappée par le vent est différemment orientée : la voile le recevant de côté, tandis que l'aile le reçoit par dessous.

Que le vent frappe la voile d'une barque ou l'aile d'un oiseau sous une incidence très oblique, il se réfléchit sur cette surface et s'échappe en produisant une réaction qui pousse la barque ou l'oiseau dans une direction plus ou moins opposée à la sienne.

La barque à voile, objectera-t-on, ne navigue *au plus près du vent*, que parce qu'elle a une quille pour l'empêcher *de dériver*, c'est-à-dire de céder latéralement à la pression de l'air sur la voile. Or, en raison de l'orientation de l'aile de l'oiseau, l'action de l'air, qui tend à le faire dériver, s'exerce de bas en haut; cette force, que nous avons appelée *poussée ascendante*, trouve dans la pesanteur une autre force qui la contrebalance plus ou moins, suivant que l'oiseau veut garder sa hauteur, s'élever ou s'abaisser.

Reste à trouver l'équivalent de l'action du gouvernail qui empêche le bateau de dériver de sa ligne de marche. On accordera facilement que l'oiseau, pour maintenir la direction de son vol, peut se servir de sa queue comme d'un gouvernail et obtenir

encore le même effet, en déplaçant son centre de gravité. Car, en supposant que l'action du vent sous les ailes tende à faire tourner l'oiseau et à le culbuter en avant, un simple déplacement du centre de gravité en arrière empêchera cet effet de se produire.

Il semble donc que le bateau à voile et l'oiseau voilier soient dans des conditions tout à fait comparables ; alors l'expression de *vol à voile*, bien loin de consacrer une erreur, rend fort bien compte du mécanisme de ce genre de vol. Du reste, des officiers de marine, qui ont étudié le vol à voile, ont assuré qu'on trouverait, dans les manœuvres de la navigation voilière, d'utiles éléments pour éclairer le mécanisme du vol.

Goupil cite des faits intéressants qui montrent que, suivant sa courbure ou son degré de tension, la voile d'une barque éprouve, de la part du vent, des impulsions différemment dirigées [1]. L'aile de l'oiseau doit éprouver des effets semblables suivant sa courbure et sa tension.

1. Goupil (*loc. cit.*, p. 27). Soient en projection horizontale (fig. 160, nos 1 et 2) des voiles triangulaires, dont la pointe est tournée vers le bas de la figure. Deux flèches semblablement orientées expriment la direction du vent.

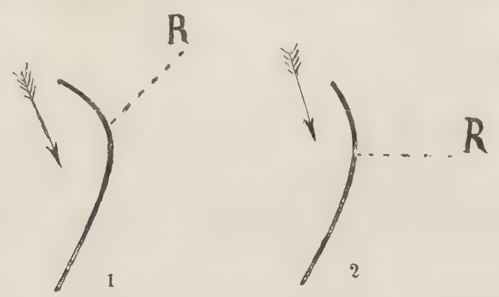


Fig. 160. — Influence de la courbure des voiles sur la direction de la résultante R de l'action du vent (d'après Goupil).

Si la voile est peu tendue, comme au n° 1, l'action du vent aura pour résultante une poussée suivant R ; si la même voile est plus tendue, comme en 2, la résultante R sera autrement dirigée.

Le même auteur rapporte des expériences dans lesquelles, en faisant agir un courant d'air sous une surface en forme de calotte, il aurait obtenu, sur cette surface, une poussée directement orientée contre le vent (*loc. cit.*, p. 29).

§ 190. **Premiers essais d'une théorie du vol à voile.** — Si l'on admet, avec la plupart des auteurs, la réversibilité des actions de l'aile contre l'air et de l'air contre l'aile, c'est-à-dire si l'on suppose que les choses se passent de la même façon, quand un oiseau se meut dans un air calme avec une certaine vitesse, ou quand, immobile, il est frappé par un vent de même vitesse, on est en droit de comparer les manœuvres du vol à voile à celles du vol plané.

Or, du moment où il est prouvé que, suivant l'angle de ses ailes avec la direction de son vol, l'oiseau peut faire prédominer l'une ou l'autre des deux composantes de la résistance de l'air (§ 139), on peut supposer que, si la force du vent est suffisante, l'oiseau pourra voler par la seule action de ce vent. En effet, en inclinant convenablement ses ailes, il pourra, d'une part, gagner beaucoup de hauteur en subissant peu d'entraînement, puis ayant acquis cette hauteur, la dépenser, avec une nouvelle orientation de ses ailes, en regagnant contre le vent plus de chemin que ne lui en aura fait perdre l'entraînement subi.

C'est avec un raisonnement de ce genre, que d'Esterno, en 1864, essayait déjà d'établir la théorie du vol à voile [1].

D'Esterno ne pense pas que l'oiseau puisse faire du vol à

1. D'Esterno, *Du vol des oiseaux*, 1864, p. 40, conçoit ainsi la transformation de hauteur en vitesse.

« Supposons, dit-il, que l'oiseau se laisse glisser sans battements sur l'air calme, en transformant 1 mètre de hauteur en 8 mètres de translation. Prenons un oiseau qui parcoure 1 kilomètre à la minute, soit à peu près 8 mètres en une demi-seconde; lançons cet oiseau dans un vent de 8 mètres en une demi-seconde et coupant à angle droit la marche de l'oiseau. Supposons que ce vent soulève l'oiseau de 2 mètres pendant qu'il l'entraîne de 8 mètres. L'oiseau n'éprouve pas le besoin de s'élever, il faut donc qu'il dépense, pour chaque demi-seconde, les 2 mètres de hauteur qu'il acquiert. Qu'en fera-t-il? Il transformera 1 mètre de hauteur en 8 mètres de marche contre le vent, pour contrebalancer l'effet égal d'entraînement que le vent fait contre lui : il lui restera à dépenser 1 mètre de hauteur qu'il transformera également en 8 mètres de translation et avec lequel il produira 8 mètres de progression utile dans le sens où il veut aller. Ainsi, comme résultat définitif, le vol à voile lui donnera, toutes pertes déduites, une marche de 1 kilomètre à la minute. »

voile contre le vent, autrement qu'en dépensant sa vitesse acquise. D'autres auteurs sont plus hardis. Mouillard (§ 10) a vu certains oiseaux, partant de l'immobilité, s'élever, sans un coup d'ailes, en gagnant sur le vent contre lequel ils progressaient. Pour Audubon[1], la Frégate tient tête à la tempête et se balance sans reculer. D'après le même auteur, le Pétrel fulmar monte contre le vent, en affrontant la violence de l'ouragan[2]. J'ai vu moi-même des Goélands voler à voile contre un vent très violent; ils progressaient alors avec une grande lenteur, moins de deux mètres par seconde. De l'aveu de tous les auteurs qui ont observé l'ascension directe de l'oiseau contre le vent, ce phénomène exige une forte brise pour se produire. Quand le vent est faible, l'oiseau, suivant Mouillard, s'élève en décrivant des orbes.

Une trajectoire circulaire permettrait donc d'utiliser, pour le vol à voile, un vent trop faible pour permettre les trajectoires rectilignes. C'est en décrivant ses orbes que l'Aigle se soutient dans l'air raréfié des grandes hauteurs : Humboldt l'a vu voler ainsi à une altitude de 7 300 mètres.

Davidson, en 1874, essayait d'expliquer le vol en orbes, en supposant que l'oiseau gagne de la hauteur dans la partie des cercles qu'il parcourt contre le vent, et qu'il n'en perd pas dans le parcours exécuté sous le vent[3].

1. Audubon, *loc. cit.*, t. II, p. 314.
2. Audubon, *loc. cit.*, t. II, p. 279.
3. Davidson (*Scientific American*, 27 mars 1871) décrit ainsi le mécanisme du vol à voile. « L'oiseau partant, les ailes étendues, d'un sommet élevé, décrira un cercle complet pour revenir à son point de départ. En air calme, ce mouvement tournant s'accompagne toujours de perte de hauteur, de sorte qu'après un certain nombre de tours l'oiseau est descendu au niveau du sol. Mais s'il souffle un vent de 5 milles de vitesse à l'heure, dans l'une des moitiés de la circonférence décrite, de A en B par le haut (fig. 161), l'oiseau sera poussé par le vent qui le fera descendre en même temps; mais dans l'autre moitié BCA, l'oiseau présentant au vent la face inférieure concave de ses ailes perdra de sa vitesse et s'élèvera jusqu'à la fin du demi-cercle parcouru. Répétant ainsi ses mouvements circulaires, gagnant un peu de hauteur à chaque parcours effectué contre le vent et ne perdant *rien* (*sic*)

Cette théorie ne satisfait pas entièrement, car on ne comprend pas bien pourquoi l'oiseau ne perd pas, quand il cède au vent, la hauteur qu'il a gagnée en volant contre le vent. Mais la théorie s'éclaire, si l'on tient compte de la masse de l'oiseau et des effets de l'inertie.

§ 191. Rôle de l'inertie de l'oiseau. — Tous les auteurs qui se sont occupés du vol à voile, Mouillard, Basté[1] et d'autres, ont fait jouer un rôle important à la *masse* du corps ; ils ont montré que les oiseaux trop légers ne peuvent voler à voile ou volent mal, par les grands vents. Cela tient à ce qu'un oiseau trop léger

dans le parcours sous le vent, grâce à la vitesse de sa translation, l'oiseau monte dans l'air, les ailes immobiles, et peut s'y soutenir un jour entier

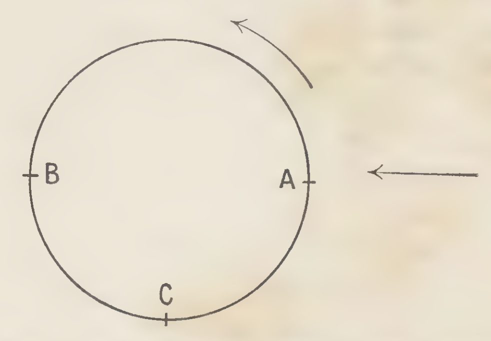


Fig. 161. — Projection d'un des orbes d'un oiseau voilier. La flèche rectiligne indique la direction du vent ; l'autre exprime le sens du mouvement.

sans autre effort que celui qu'exige le maintien de ses ailes étendues et la direction du vol suivant un cercle. »

1. Mouillard admet que la masse de l'oiseau emmagasine la force du vent et acquiert une vitesse qui peut être retournée contre le vent lui-même. L'oiseau, quand il a le vent debout, orienterait ses ailes sous un angle convenable pour s'élever.

Pour Basté également (*loc. cit.*, p. 191), plus l'oiseau est pesant, plus il manœuvre aisément au milieu des courants aériens. « Si le Naucler, dit-il, ne pesait comme le moineau que 20 ou 30 grammes, il lui serait très difficile de pratiquer le vol à voile, car la moindre variation du courant aérien ferait osciller son corps. Par suite, les ailes ne pourraient être maintenues sous une inclinaison précise, et le vent, agissant avec force sous ces ailes mal orientées, soulèverait et emporterait le Naucler sans qu'il puisse résister.

prend trop facilement la vitesse du vent, et perd trop facilement sa force vive quand il la retourne contre le vent.

Or, les mouvements de l'air n'existent plus pour les objets que le vent entraîne. L'aéronaute, dans son ballon, emporté par une violente tempête, n'éprouve pas le plus léger souffle d'air. Le cerf-volant dont on coupe la corde cède au vent, n'est plus soutenu et tombe à terre. L'oiseau qui aurait acquis toute la vitesse du vent tomberait comme en air calme.

De même que dans le mécanisme du cerf-volant (§ 177), il ne faut donc tenir compte, dans celui du vol à voile, que de la vitesse du vent par rapport à l'oiseau; les déplacements de l'air par rapport au sol sont tout à fait insignifiants[1].

Or, l'inertie de la masse d'un oiseau produit des effets assimilables à ceux de la corde d'un cerf-volant. L'oiseau résiste à l'entraînement par son inertie; ce n'est que graduellement, et par un mouvement uniformément accéléré, qu'un vent de force constante pourra lui communiquer sa propre vitesse. Si l'on se souvient que, par la forme de son corps (§ 135) et par l'angle très aigu sous lequel son aile se présente au vent (§ 139), l'oiseau donne fort peu de prise à l'entraînement, on comprendra que l'effort du vent, presque tout entier, ait pour effet de soulever l'oiseau et que celui-ci puisse, *pendant quelque temps*, monter en n'éprouvant qu'un entraînement insensible.

§ 192. **Influence des intermittences du vent.** — Considérons un oiseau immobile dans l'espace au point *a* (fig. 162), et supposons qu'à ce moment une forte brise vienne à souffler. Si l'aile fait un angle très faible avec la direction du vent, la composante verticale prédominant beaucoup sur la composante horizontale, l'oiseau s'élèvera en subissant un entraînement très faible, mais accéléré, qui le portera en *b*. L'ascension sera d'abord accélérée, comme l'indique l'écartement croissant des positions successives de l'aile; puis cette ascension se ralentira,

1. Dans ses belles études sur la direction des aérostats, M. le commandant Renard a développé, d'une façon remarquable, des considérations de cet ordre. (*Revue de l'Aéronautique*, de H. Hervé, n° 1, 1887.)

à mesure que l'entraînement de l'oiseau diminuera la vitesse relative du vent.

Admettons que le vent cesse quand l'oiseau sera en *b* ; en donnant à ses ailes une légère inclinaison en dessous de l'horizon (5 degrés d'après Bretonnière, § 182), l'oiseau pourra glisser sur l'air et se porter en avant, sous un angle de 10°, c'est-à-dire gagner plus de chemin que l'entraînement par le vent ne lui en a fait perdre tout à l'heure ; il arrivera ainsi en *a'*. A ce moment, que le vent souffle de nouveau, l'oiseau recommencera à monter ; mais, cette fois, comme il possède une certaine vitesse, sa force

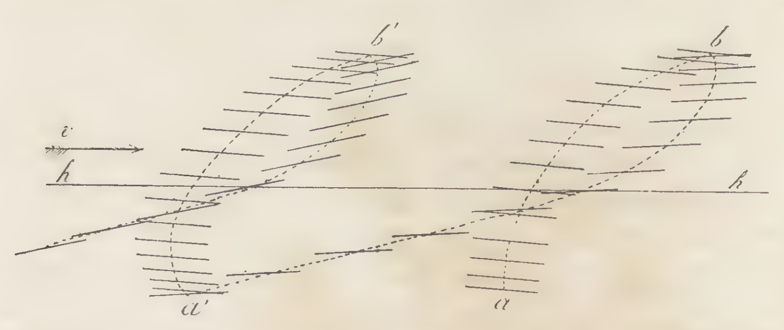


Fig. 162. — Montrant théoriquement les déplacements d'un oiseau soulevé par des rafales intermittentes et glissant sur l'air, dans l'intervalle des coups de vent. La coupe de l'aile est figurée par une ligne plus ou moins inclinée sur l'horizon.

vive ne s'éteindra pas tout de suite : il progressera donc pendant les premiers instants de sa remontée, et de plus, en raison de sa vitesse propre qui s'ajoute à celle du vent, il s'élèvera plus vite qu'il ne l'a fait en partant du point *a*, car alors nous l'avions supposé immobile. Avec des intermittences du vent convenablement espacées, l'oiseau pourrait donc progresser indéfiniment contre le vent.

Dans une lettre encore inédite qu'il m'a fait l'honneur de m'adresser, A. Bazin propose une ingénieuse manière de représenter ce phénomène. Dans l'acte de la ressource, l'oiseau glisse sur l'air, comme ces chariots lancés sur les *montagnes russes* et qui, en raison de leur vitesse acquise dans la descente, remontent une autre rampe, mais sans pouvoir s'élever à la hauteur de leur

point de départ. Imaginons qu'au moment où le chariot remontant s'arrête dans son ascension, le sol de la montagne russe se déplace brusquement au-devant de lui : le chariot, résistant à l'entraînement par son inertie, sera soulevé, le sommet de la montée passera au-dessous de lui et, par l'action de la pesanteur, une descente se produira sur l'autre rampe, suivie d'une remontée à la fin de laquelle un pareil déplacement du sol fera franchir au chariot un second sommet et cela indéfiniment[1].

1. Ce phénomène peut être rendu plus sensible au moyen de la photochronographie. Sur le bord d'une planche peinte en noir découpons (fig. 163) une courbe onduleuse, creusée en gouttière sur la tranche, et dont les sommets soient de plus en plus hauts, de A en D. Plaçons cette planche verticalement; une bille lâchée du point D roulera en franchissant la série

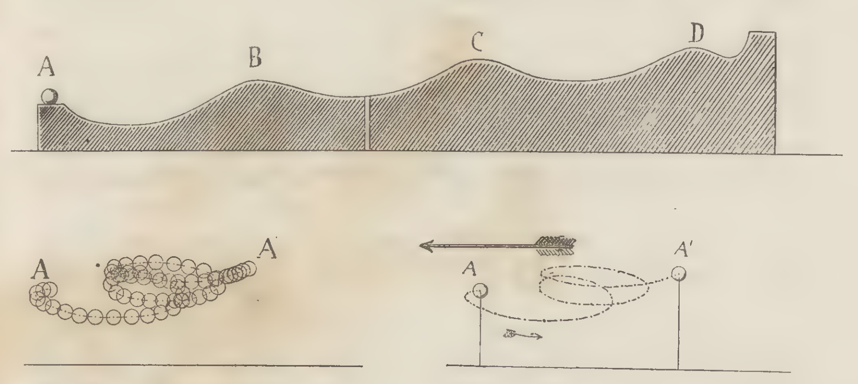


Fig. 163. — Expériences photochronographiques démontrant la théorie de Bazin sur les effets d'un vent intermittent dans le vol à voile.

des sommets et s'échappera en A après avoir décrit une série d'oscillations ressemblant de tous points aux *ressources* d'un Faucon.

Mais si nous plaçons la bille en A, celle-ci, après avoir descendu la première pente, puis remonté vers le sommet B, s'arrêtera sans le franchir; poussons alors la planche au-devant de la bille, celle-ci sera soulevée, pendant que le sommet B passera au-dessous d'elle, puis elle redescendra la pente de B en C, etc.

Or, la photochronographie permet de saisir l'évolution de la bille et le mouvement de la planche. Il suffit, pour cela, que la bille soit brillante; la série de ses positions successives est représentée de A en A' (à gauche de la figure). Ces positions sont plus nettes encore dans la courbe de droite, où le centre de la boule est seul représenté. On voit que cette boule décrit dans l'espace un mouvement en spirale dans le plan vertical; elle progresse

Ces intermittences du vent sont-elles indispensables et ne peut-on pas admettre que, dans un vent de force constante, un oiseau puisse à son gré gagner de la hauteur, puis glisser en descendant contre le vent ; et cela par le seul changement de l'inclinaison de ses ailes? Basté semble l'admettre, lorsqu'il représente la trajectoire de l'oiseau volant contre le vent (fig. 8)[1]. Il y a là, toutefois, un point fort délicat de mécanique, sur lequel les mathématiciens devront se prononcer. En tout cas, il semble certain que l'oiseau peut, au moyen de certains artifices, créer des intermittences du vent, même quand celui-ci souffle d'une façon régulière. Voici, à cet égard, l'opinion de plusieurs auteurs.

§ 193. Artifices de l'oiseau pour créer des intermittences du vent. — D'Esterno avait déjà supposé que le vol en zig-zag de certains oiseaux au moment de l'essor avait pour effet d'accroître la vitesse de leur vol. Ainsi les *crochets* bien connus de la Bécassine au départ n'auraient point pour but de déjouer l'habileté du tireur, mais de hâter la fuite de l'oiseau.

Bazin[2], et surtout Bretonnière[3], ont montré qu'en changeant

en sens contraire du mouvement imprimé à la planche, et qui est indiqué par la grande flèche.

Mouillard prétend que l'intermittence existe toujours dans les coups de vents, depuis les plus faibles brises, jusqu'aux ouragans les plus violents. Si les météorologistes ont, jusqu'ici, négligé de démontrer cette intermittence au moyen d'appareils inscripteurs, son existence est entièrement prouvée par les modulations lamentables que produit le vent quand il s'engouffre dans nos cheminées (Mouillard, *loc. cit.*, p. 221).

1. La figure 8 qui représente le vol stationnaire d'après Basté montre aussi une élévation suivie de glissement descendant. Il faut remarquer toutefois que la série des attitudes indiquées dans cette figure par des numéros d'ordre n'est pas celle que Basté avait indiquée. Pour lui, l'oiseau monte par la moitié postérieure de la courbe, et redescend par l'antérieure. Des flèches placées dans la figure originale de son mémoire, et l'inclinaison même des ailes, ne laissent pas de doute à cet égard. Dans la reproduction de cette figure, l'idée que je me faisais du mécanisme de ce genre de vol m'a empêché de voir que j'interprétais mal la pensée de l'auteur. Mais je suis porté à croire que le mouvement doit se passer en réalité comme je l'ai représenté.

2. Bazin, *in litteris*.

3. Bretonnière, *Étude sur le vol plané* (*L'Aéronaute*, juillet 1889).

la direction de son vol, l'oiseau crée artificiellement des variations de l'intensité du vent.

Supposons, en effet, qu'un oiseau reçoive le vent par le côté droit et vole en décrivant des zigzags dans un plan horizontal. Chaque fois que l'oiseau infléchira son vol vers la droite, la quantité de chemin qu'il fera contre le vent en augmentera la vitesse relative; inversement, cette vitesse diminuera lorsque l'oiseau, changeant de direction, cédera plus ou moins au vent. Ces rafales artificielles devront avoir des effets analogues à ceux qui viennent d'être décrits.

Mais c'est surtout dans le vol par orbes, que l'oiseau obtient une grande inégalité de la vitesse relative du vent, car dans le cercle qu'il décrit il vole, tour à tour, avec vent debout et avec vent arrière.

§ 194. **Mécanisme du vol par orbes.** — Dans la partie de son orbe où il vole vent arrière, l'oiseau voilier résiste par son inertie à l'entraînement. Tant que le vent a, sur l'oiseau, un excès de vitesse suffisant, celui-ci est soutenu et, suivant l'intensité de la force ascensionnelle qui agit sur lui, peut monter, garder sa hauteur ou descendre légèrement.

Avant d'avoir subi un entraînement qui lui fasse trop perdre de hauteur, l'oiseau accomplit un mouvement tournant. Comme on l'a vu plus haut § 191, il revient contre le vent, avec une vitesse de sens contraire ; la vitesse relative du vent s'en trouve accrue [1] et, avec elle, la force qui soulèvera l'oiseau. A l'entraînement que le vent tend à lui faire subir, il oppose maintenant, non seulement son inertie, mais aussi la force vive que le vent lui a communiquée. Cette force vive, l'oiseau aura intérêt à la dépenser tout entière, avant de faire un nouveau mouvement

1. Quand l'oiseau est animé d'une vitesse propre, la vitesse relative du vent, par rapport à lui, est la somme algébrique des vitesses de l'air et de l'oiseau. Ainsi, par un vent de 15 mètres, un oiseau qui a subi un entraînement de 10 mètres n'éprouve plus qu'un vent relatif de 5 mètres par seconde; mais si l'oiseau retourne cette vitesse de 10 mètres contre le vent de 15 mètres, il en résultera un vent relatif de 25 mètres à la seconde.

tournant, et à aborder sans vitesse la portion de son orbe où il va avoir, de nouveau, vent arrière.

Dans le vol en orbes, le travail moteur du vent s'emmagasine, comme dit Mouillard, dans la masse de l'oiseau qui n'a plus qu'à employer son inertie ou sa force vive, dans tel ou tel sens, pour se soutenir ou pour s'élever sans se laisser entraîner. Du reste, il n'est pas à craindre que le vent le plus violent entraîne bien loin l'oiseau, tant que celui-ci pourra effectuer son mouvement tournant, car l'entraînement lui-même crée la force vive par laquelle il sera compensé[1].

Telle est, en somme, la théorie qui se dégage des récents travaux sur le vol à voile et particulièrement des belles études de Basté[2]. Cet auteur a même cherché à donner l'évaluation numérique du travail dépensé par l'oiseau, dans les différents actes du vol à voile.

1. Cette théorie me semble échapper entièrement au reproche qu'on a fait aux premières explications du vol à voile, d'impliquer en quelque sorte le mouvement perpétuel. Dans le vol à voile, en effet, il existe une source naturelle de travail moteur, le vent; l'oiseau en utilise les effets par différentes manœuvres. On ne peut pas plus comparer au mouvement perpétuel les actes du vol plané, que ceux d'un enfant qui, monté sur une escarpolette, s'imprime à lui-même un balancement indéfini en déplaçant, à des instants opportuns, le centre de gravité de son corps. Les *ressources* de l'oiseau chasseur ressemblent de tous points au balancement du corps sur une escarpolette; de même que ces balancements, les ressources peuvent sans doute être indéfiniment entretenues par des déplacements du centre de gravité du corps par rapport au centre de pression de l'air sous les ailes. Enfin, s'il règne un vent assez fort, il est probable que, par des changements d'inclinaison des ailes, l'oiseau pourra aussi entretenir son mouvement de balancement.

Supposons, en effet, qu'assis sur une escarpolette et recevant de face un vent régulier, nous tenions entre les mains deux palettes à larges surfaces. Si nous présentons au vent la surface de ces palettes, nous serons plus ou moins portés en arrière; retournons alors les palettes de façon qu'elles n'offrent au vent que leur tranche : une oscillation de l'escarpolette nous fera revenir en avant et dépasser la verticale. A ce moment, présentons de nouveau la surface des palettes au vent, nous serons renvoyés en arrière plus loin que tout à l'heure; un nouveau changement d'orientation nous fera revenir en avant avec une force croissante, et ainsi de suite.

2. Basté, *loc. cit.*, p. 211.

§ 195. Observations et calculs de Basté sur le vol à voile. — Après avoir décrit les diverses évolutions des oiseaux voiliers qu'il a étudiés avec une attention soutenue, pendant plusieurs années, Basté cherche à expliquer mathématiquement les différents types de ce vol : ceux-là même dont on a vu des exemples au chapitre Ier, sous les noms de *planement circulaire avec entraînement*, *planement elliptique sans entraînement*, *vol stationnaire*, etc. [1].

La connaissance de la pression produite par les vents de différentes vitesses, et celle de la décomposition de cette pression pour les divers inclinaisons de l'aile, sont les données suffisantes pour ces calculs.

L'auteur admet, avec de Louvrié et Pénaud, que, pour l'oiseau qui oriente ses ailes au vent sous un très petit angle : de 1° à 7, la poussée de l'air a pour valeur $P = S \sin \alpha (p. V^2)$. Dans cette formule, S est la superficie totale des ailes en centimètres carrés ; α l'angle que font les ailes avec la direction du vent ; p la pression d'un vent d'un mètre de vitesse sur une surface d'un mètre carré frappée normalement (soit $0^k,1353$ décig.) ; V la vitesse du vent en mètre, par seconde [2].

Avec cette formule, Basté traite, comme un problème de mécanique ordinaire, l'interprétation des différentes manœuvres du vol à voile que l'observation lui a permis de constater.

Voici l'un de ces problèmes : « Par un vent très fort, d'une vitesse de 20 mètres à la seconde, une Mouette du poids de 295 grammes effectue une ascension directe. Quelle a dû être la pression du courant aérien sous les ailes de cet oiseau, la superficie totale de ses ailes étant de 0,0960 centimètres carrés et leur inclinaison 5° ? » Le calcul [3] montre à Basté qu'avec des ailes ainsi inclinées, l'oiseau serait soulevé par une force de $0^k,452$,

1. On trouve aussi de remarquables vues sur le vol à voile dans un Mémoire inédit de Bazin, et dans le travail de Bretonnière (*loc. cit.*).

2. Pour les angles plus grands, l'oiseau subit un entraînement sensible et la vitesse relative du vent ne se confond plus avec la vitesse absolue.
Dans ce cas, $P = S \sin \alpha p (V - (v \sin \alpha)^2$.

3. $P = 0{,}0960 \times 0{,}0871557 \times (0{,}1353 \times 400)$ d'où $P = 0^k,452$ grammes.

très supérieure à son poids. La Mouette n'a donc besoin, pour rester soutenue, que d'orienter son aile sous un angle de 3°30'.

Le problème suivant est traité de la même manière : « Par bonne brise (9 mètres à la seconde), un Faucon se maintient dans l'espace sans battement d'ailes ; le poids de l'oiseau étant 208g,76, sa surface alaire 1,188 centimètres carrés et l'inclinaison des ailes 12° ; quelle est la pression de la brise sous les ailes? »

Le calcul donne $P = 0^k,274$, supérieure au poids de l'oiseau [1].

Il faut noter que, dans tous ses calculs, Basté adopte, pour valeur de la résistance de l'air et de la décomposition de cette résistance, les nombres trouvés par les physiciens en opérant sur des plans minces et rigides ; or, tout porte à croire que, par sa forme et par son élasticité, l'aile présente des conditions plus favorables encore à la sustension de l'oiseau [2].

Ces calculs de Basté ne sauraient s'appliquer rigoureusement qu'à *des instants fort courts* du vol à voile, puisque le corps de l'oiseau subit un entraînement accéléré qui diminue la vitesse du vent relatif et change les conditions du vol. On a vu comment l'oiseau échappe à cet entraînement, soit par des changements de direction comme dans le vol en orbes, soit par des glissements descendants.

§ 196. **Plan d'expériences à faire pour éclairer le mécanisme du vol à voile.** — Si les calculs ci-dessus rapportés montrent que le vol à voile n'est pas, comme on le prétendait autrefois, une absurdité mécanique, il n'en est pas moins vrai qu'ils ne paraissent pas expliquer complètement les manœuvres de l'oi-

1. Dans les conditions du problème, dit Basté, l'angle formé par les ailes avec la direction de la brise étant assez ouvert, le planement sera par conséquent accompagné d'entraînement dans le sens du courant aérien. On doit donc, dans ce cas, appliquer une autre formule qui donne la vitesse du vent relatif et dans laquelle

$$P = 0,1188 \times 0,2079117 \times 0,1353 \times (9 - 0,20791172)^2 = 0^k,274 \text{ grammes.}$$

2. De Louvrié (*L'Aéronaute*, janvier 1888, p. 10) admet même que, pour de petits angles, la force qui soulève l'aile de l'oiseau est proportionnelle à $2 \sin \alpha$ et non au sinus simple de α. La sustension de l'oiseau s'obtiendrait donc encore plus facilement que ne l'admet Basté.

seau voilier. Entre les deux phases opposées, où l'oiseau vole vent arrière, puis vent debout, il y a des phases intermédiaires où il reçoit le vent de côté. C'est à ces instants, que l'oiseau exécute les mouvements qui changent la direction de sa force vive par rapport à celle du vent. Or, tandis qu'il franchit les portions de son orbe perpendiculaires à la direction du vent, quelle est la force qui le soutient?

Les observateurs s'accordent à admettre que, dans son parcours circulaire, l'oiseau est incliné comme un cavalier dans un cirque, c'est-à-dire que l'aile tournée vers le centre de l'orbe est plus basse que l'autre. S'il en est ainsi, l'oiseau présentera au vent sa face ventrale, à l'un des instants considérés, et alors il sera soutenu par le vent; mais, à l'extrémité diamétralement opposée de son orbe, l'oiseau recevra le vent par sa face dorsale, ce qui aura pour effet de le faire descendre[1]. Échappera-t-il à cette chute par l'extrême rapidité de son mouvement pendant ce passage dangereux? C'est là ce qu'il est important de connaître; et comme l'observation semble insuffisante, il y a lieu d'instituer certaines expériences pour déterminer les conditions véritables du vol à voile.

La forme réelle de la trajectoire de l'oiseau, sa vitesse, ses attitudes aux différents points de son parcours, enfin la direction du vent, tels sont les différents points qu'il est indispensable d'établir.

Dans les publications relatives au vol à voile, on trouve souvent la trajectoire du vol par orbes représentée en plan et en élévation[2]. Mais si ces figures, tracées sans points de repères fixes, expriment l'aspect général des orbes décrits, on ne saurait avoir une pleine confiance dans leur fidélité. Et même, en admettant

1. J'ai dit § 12 comment l'oiseau qui vole en orbes change brusquement l'inclinaison du plan de sa queue aux deux diamètres opposés du cercle parcouru, cette inclinaison étant telle, que le vent soulève toujours la queue et la partie postérieure du corps.

2. Cette double représentation se trouve dans le travail de Basté et dans les mémoires inédits de Bazin et de Bretonnière.

qu'un observateur exercé puisse tracer avec une précision suffisante la trajectoire de l'oiseau voilier, il manquera toujours, dans cette figure, une notion importante, celle des positions de l'oiseau à des intervalles de temps égaux, d'où l'on puisse déduire les phases de sa vitesse.

On a vu § 92 que les trajectoires photochronographiques

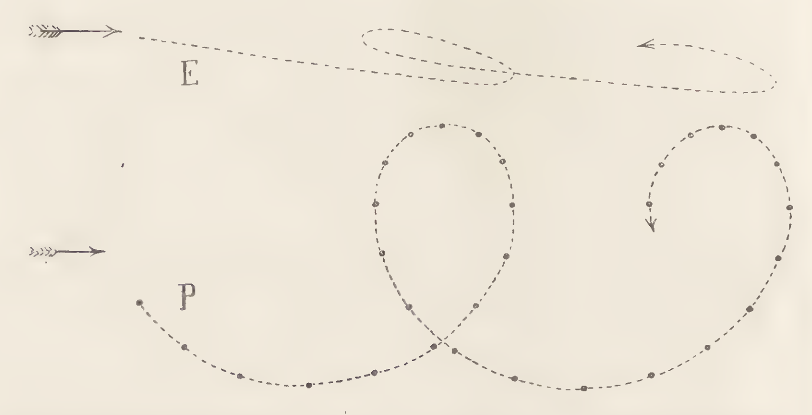


Fig. 164. — Trajectoires chronographiques d'un oiseau volant à voile. P, projection horizontale: E, élévation (figure théorique).

renseignent complètement sur les phases du mouvement d'un point; une telle trajectoire exprimerait complètement les mouvement de l'oiseau voilier. Mais il n'est pas possible de recourir à la photochronographie ordinaire, puisque l'oiseau planeur se détache en noir sur le fond éblouissant du ciel; l'emploi des chambres noires et du style chronographique (§ 177) répondra à tous les besoins.

La figure 164 représente théoriquement les trajectoires chronographiques de l'oiseau, en projection verticale et en projection horizontale. En P, l'oiseau volait au zénith de l'observateur; en E, la trajectoire a été obtenue par un observateur placé à la même hauteur que l'oiseau. Si les points qui composent chacune de ces trajectoires ont été produits par le style à des intervalles d'une seconde, on verra, d'après l'écartement différent de ces points sur la trajectoire P, que la vitesse de l'oiseau, dans son parcours

sous le vent, était plus grande que dans son parcours contre le vent. Cela donnera déjà la notion des *vitesses relatives*.

La trajectoire E, en projection verticale, se prête mal à l'estimation des vitesses, car l'écartement des points y est altéré par la perspective; mais, en revanche, les différences de niveau sont très sensibles dans cette figure : on y voit, par exemple, que l'oiseau monte contre le vent et descend quand il a vent arrière.

La combinaison des trajectoires P et E permettra d'estimer géométriquement les dimensions des orbes, et par conséquent, la *vitesse absolue* de l'oiseau, à chaque instant de son vol.

Quelques photographies instantanées, prises à différents points du parcours de l'oiseau, renseigneront au besoin sur ses changements d'attitudes. Enfin, si l'on voulait connaître exactement la vitesse et la direction du vent, j'imagine qu'en lançant quelques petits ballons perdus, l'un d'eux au moins aurait chance de parcourir le champ observé, et l'on en pourrait également tracer la trajectoire chronographique.

Ce plan d'expérience est fort simple, en principe, mais la réalisation en sera peut-être difficile. Avant tout, il faudra que l'expérimentateur se transporte, avec ses appareils, dans les pays où les Aigles, les Vautours et les Pélicans donnent le spectacle du vol à voile. Mais l'importance des résultats qu'il s'agit d'obtenir mérite bien qu'on ne s'arrête pas aux difficultés de l'expérience.

CHAPITRE XXI

DU TRAVAIL DÉPENSÉ DANS LE VOL

Définition du travail mécanique. — Estimation du travail dépensé dans le vol ramé; insuffisance des données expérimentales sur les mouvements de l'oiseau. — Travail moteur mesuré d'après les données cinématiques de la photochronographie. — Le travail, à l'essor, est plus grand qu'en plein vol. — Travail dans le vol ascendant et dans le vol descendant. — Travail relatif des grands et des petits oiseaux. — Pendant la remontée de l'aile, les muscles pectoraux font du travail négatif. — Tout le travail dépensé dans le vol ramé se produit dans le coup d'abaissement de l'aile. — L'oiseau dépense-t-il du travail dans le vol plané et dans le vol à voile?

§ 197. Beaucoup de problèmes de mécanique animale pourront être résolus par les méthodes exposées dans les précédents chapitres.

En ce qui concerne la locomotion aérienne, il est une question qui, plus que toutes les autres, préoccupe les esprits : *Quel est le travail que l'oiseau dépense pour voler?* Suivant la réponse qui leur sera faite, ceux qui cherchent à créer des appareils volateurs sauront s'ils peuvent trouver, dans la force musculaire de l'homme, ou dans les machines dont on dispose aujourd'hui la production de travail nécessaire pour réaliser leurs projets.

§ 198. **Définition du travail mécanique.** — Jusqu'au commencement de ce siècle, on ne savait pas estimer la force des moteurs animés ni celle des machines. La commune mesure est fixée aujourd'hui ; c'est le *travail mécanique* dont la définition ordinaire est *le produit d'une force par le chemin qu'a parcouru son point d'application*[1]. L'unité de force, ou *kilogrammètre*, est

1. La force ou l'effort F multiplié par l'espace parcouru E, c'est-à-dire le produit FE, exprime le travail effectué. Cette formule a une autre expression, quand le travail est produit par la pesanteur ou contre la pesanteur. Quand un corps, par exemple, a été élevé à une certaine hauteur, il a fallu

le travail représenté par le poids d'un kilogramme élevé à un mètre de hauteur.

Le travail d'une machine, ou d'un moteur animé, peut toujours être exprimé en kilogrammètres, mais à la condition que l'on connaisse bien l'intensité de l'effort déployé par le moteur et qu'on mesure exactement le chemin parcouru par le point d'application de cet effort. Or, cette mesure est souvent difficile à obtenir, surtout dans les mouvements compliqués et rapides comme ceux du vol.

§ 199. **Estimation du travail dépensé dans le vol ramé; insuffisance des données expérimentales sur les mouvements de l'oiseau.** — Un certain nombre d'auteurs ont essayé toutefois de calculer le travail dépensé dans le vol, mais n'ayant que des données fort incertaines sur la nature des mouvements de l'oiseau, ils n'ont pu obtenir de mesure exacte.

On a beaucoup reproché à Navier d'être arrivé par le calcul à cette conclusion bien faite pour étonner : à savoir, que 13 hirondelles dépensent en volant *un cheval-vapeur*, c'est-à-dire 75 kilogrammètres, à chaque seconde. Ce qu'on doit lui reprocher surtout, c'est d'avoir basé ses calculs sur des données qui ne méritaient aucune confiance[1].

exercer contre lui un effort constamment égal à l'action de la pesanteur, c'est-à-dire au poids P du corps. Cet effort a dû se mouvoir en sens contraire de la pesanteur, c'est-à-dire verticalement, et sur un certain chemin qui se mesure par la hauteur H à laquelle le poids a été élevé. Il s'ensuit que PH, mesure du travail effectué contre la pesanteur, est identique à FE, mais s'applique à un cas plus particulier. Enfin les deux formules précédentes ne tiennent pas compte du temps employé dans le déplacement des corps ni de l'effet de l'inertie des masses. Lorsque cette notion intervient, la formule du travail est $1/2MV^2$.

1. Navier, *Mémoires de l'Institut*, t. II, 1829. L'auteur admet que l'Hirondelle, quand elle vole sur place, donne 28 battements d'ailes par seconde; 35 quand elle vole avec une vitesse de 15 mètres.

Il pense que la vitesse de l'aile est 3 à 4 fois plus grande que celle de la translation de l'oiseau, etc. Ces quelques exemples montrent que Navier a pris, comme point de départ pour ses calculs, des hypothèses dont nul observateur ne pouvait contrôler l'exactitude. — Voir, à cet égard : de Louvrié, *Equation du travail. — Erreur de Navier. — Aviation* (extrait des *Mondes*).

Babinet, sans s'inquiéter de la nature des mouvements de l'oiseau ni de la résistance de l'air, crut pouvoir raisonner de la manière suivante : « La pesanteur agissant sur l'oiseau le ferait tomber de $4^m,90$ dans la première seconde; il faut donc, pour voler horizontalement, que l'oiseau dépense, à chaque seconde, le travail nécessaire à élever son propre poids à $4^m,90$. »

André[1], Mayor[2] et d'Esterno ont très bien relevé l'incorrection de ce raisonnement[3].

Goupil[4] admet qu'un Pigeon du poids de 420 grammes est capable de faire un travail égal à $2^{kgm},50$. C'est comme s'il élevait son propre poids à $5^m,71$ par seconde. La base des calculs de l'auteur est également hypothétique sur certains points[5].

1. André, *De la navigation aérienne et de l'aviation*, Paris, E. Giraud, 1885, page 8.

2. P. Mayor, *Du maintien d'un corps dans l'espace au moyen d'une force motrice*, Lausanne, imprimerie G. Bridel, 1885, p. 11.

3. Si, disent-ils, au lieu d'une seconde, Babinet avait pris deux secondes pour unité de temps, il aurait trouvé que l'oiseau, tombant dans ce temps de $4^m,90 \times 2^2 = 19^m,60$, devrait remonter son propre poids à $19^m,60$ en deux secondes, soit $9^m,80$ par seconde. Ce travail est deux fois plus grand que celui que donnait le calcul basé sur la seconde comme unité de temps. Aussi d'Esterno conclut-il à la nécessité d'assigner sa véritable valeur au temps pendant lequel l'oiseau est soumis à la force accélératrice de la pesanteur. Choisissant pour type un oiseau qui donne cinq coups d'ailes par seconde, il estime que chacune des chutes, ne pouvant durer qu'un cinquième de seconde, se réduirait à $0^m,20$. Le travail qui compenserait l'effet de ces chutes ne serait plus, pour une seconde entière, que celui qui consisterait à relever l'oiseau cinq fois par seconde à $0^m,20$ de hauteur, soit à 1 mètre seulement.

Cette évaluation serait encore exagérée; le raisonnement, comme l'expérience, montrent que l'oiseau ne tombe pas pendant l'abaissement de ses ailes; on ne pourrait donc attribuer à la chute de l'oiseau que la moitié environ de la révolution alaire, soit 1/10 de seconde, temps pendant lequel les ailes se relèvent entre deux coups frappés sur l'air. Pour cette dernière correction, la chute de l'oiseau se réduirait à $0^m,049$, cinq fois par seconde, soit $0^m,245$ à la seconde.

4. Goupil, *loc. cit.*, p. 43.

5. L'auteur arrive, de trois façons, à ce chiffre de $2^{km},50$:

1° En égalant le travail que doit faire l'oiseau à *celui de la pesanteur dans*

§ 200. Travail moteur mesuré d'après les données cinématiques de la photochronographie. — Il est évident que les évaluations du travail dépensé par l'oiseau auront d'autant plus de valeur, qu'elles reposeront sur une connaissance plus précise des actes cinématiques du vol.

La photochronographie donnera, à cet égard, tous les renseignements nécessaires quand elle aura reçu les perfectionnements dont nous avons parlé plus haut § 112 et surtout quand on aura déterminé, avec une grande précision, la position du centre de gravité de l'oiseau, pour chaque attitude de ses ailes[1].

La mesure absolue du travail effectué par l'oiseau n'en restera pas moins une opération délicate, exigeant des connaissances mathématiques étendues[2]. En outre, cette mesure ne sera applicable qu'à l'instant du vol auquel se rapportent les documents

la chute qu'elle lui ferait faire dans le même temps. — C'est le raisonnement de Babinet dont l'inexactitude a été signalée tout à l'heure.

2° En estimant le travail du Pigeon d'après celui qu'un homme serait capable de faire, et en supposant que le travail de l'homme et celui de l'oiseau soient proportionnels à leurs poids respectifs. — Tout prête à la critique dans cette évaluation : le Pigeon d'une part est relativement mieux pourvu de muscles que l'homme et ne saurait lui être comparé. D'autre part, une erreur, sans doute, a fait trouver le nombre de $0^{km},450$ que donne le calcul.

3° Goupil voyant un Pigeon voler sur place estime à six par seconde le nombre de ses coups d'ailes, l'amplitude de ses mouvements à 170°, ce qui correspondrait à un déplacement de $0^{m},50$ du point d'application de la résistance de l'air. L'auteur admet en outre que l'aile est active dans les deux sens de ses mouvements ; il estime enfin à $0^{kil},450$ (poids de l'oiseau) la résistance de l'air et à 6 mètres le parcours effectué par le point d'application de cette résistance.

De ces données il tire, pour la valeur du travail : $0^{k},240 \times 6 = 2^{km},50$. On a vu § 168 qu'il n'est pas admissible que l'aile soit également active dans les deux sens de son mouvement; en outre le nombre de six battements d'ailes par seconde est plus faible que celui que l'expérience donne pour le vol du Pigeon. Les résultats obtenus par Goupil dans la mesure du travail ne paraissent donc pas mériter une grande confiance, malgré la coïncidence fortuite des trois méthodes employées.

1. La méthode de Borellus (§ 116) donne, à cet égard, des approximations trop grossières et peut amener des erreurs importantes dans l'estimation du travail.

2. Voir à ce sujet le *Mémoire du capitaine de Labouret* à la fin de ce volume.

photochronographiques. On va voir, en effet, que la quantité de travail dépensé par l'oiseau varie sans cesse, et décroît à mesure que s'accroît la vitesse du vol.

§ 201. **Le travail est plus grand à l'essor qu'en plein vol.** — La dépense de travail dans le vol ramé atteint son maximum au moment de l'essor et pendant quelques instants seulement. Aussitôt que l'oiseau a acquis de la vitesse, le vol lui devient bien plus facile : l'air résiste davantage sous l'aile, et l'amplitude des battements diminue beaucoup, en même temps que leur fréquence devient moindre. Pour ces diverses raisons, le travail de l'oiseau en plein vol doit s'abaisser bien au-dessous de sa valeur initiale.

L'observation montre, en effet (§ 20), que les Goélands ne donnent guère, en plein vol, que trois battements d'ailes par seconde, au lieu de cinq. En supposant que chacun des coups d'ailes exige toujours le même travail, on doit admettre que, par le fait de leur moindre fréquence, la dépense de travail à la seconde serait réduite, dans le plein vol, aux 3/5 de la valeur qu'elle avait à l'essor.

On sait également (§ 146) que l'amplitude des battements de l'aile diminue dans une proportion plus grande encore que leur fréquence : dans le plein vol, elle se réduit au *tiers* environ de ce qu'elle était dans les premiers instants. Cette diminution d'amplitude réduit encore le travail dépensé à chaque battement au tiers de la valeur initiale.

Soit T le travail fait en une seconde par un oiseau à l'essor, en plein vol ce travail ne sera plus que

$$T \times \frac{3}{5} \times \frac{1}{3} \quad \text{soit} \quad \frac{T}{5}.$$

Ainsi, par l'effet d'une translation de plus en plus rapide, l'oiseau dépense de moins en moins de travail pour se soutenir sur l'air. Il est comme un marcheur qui, avançant d'abord avec peine sur un sable mouvant, rencontrerait un sol de plus en plus ferme, et s'épuiserait de moins en moins à enfoncer le sable sous

ses pieds. On a vu (§ 153) l'explication de l'accroissement de la résistance verticale de l'air sous l'influence de la rapide translation de l'oiseau. Quant à la résistance horizontale, elle décroît aussi, pendant quelque temps, sous l'influence de la vitesse, car l'aile remontante peut se présenter à l'air sous un angle de plus en plus aigu (§ 168).

Mais quand l'angle minimum est obtenu, la résistance de l'air à la translation de l'oiseau cesse de décroître ; elle augmente au contraire en raison du carré de la vitesse (§ 132), et impose une limite à la vitesse du vol.

L'observation montre du reste combien le vol de départ est fatigant. Les Pigeons, sur lesquels j'ai fait de nombreuses expériences, vivent en liberté et se jouent d'ordinaire pendant fort longtemps, en volant à de grandes distances. Ces mêmes oiseaux refusaient de voler, après cinq ou six essors dans lesquels ils parcouraient chaque fois 20 mètres à peine ; ils restaient haletants, le bec ouvert ; si on les forçait à un nouvel essor, ils ne donnaient plus qu'un vol descendant et se reposaient presque aussitôt.

§ 202. **Travail dans le vol ascendant et dans le vol descendant.** — Indépendamment du travail nécessaire pour se soutenir et se propulser, les oiseaux, quand ils s'élèvent en volant, font encore un travail supplémentaire qui a pour mesure leur poids multiplié par la hauteur à laquelle ils s'élèvent. Ce travail, toutefois, ne s'ajoute pas entièrement à celui du vol proprement dit, car l'ascension d'un oiseau s'accompagne toujours d'une perte de vitesse, comme l'ont si bien observé Huber et les fauconniers (§ 4) ; d'après eux, un oiseau qui s'élève sous un angle de 15° volerait *trois fois moins vite* que dans un plan horizontal.

Dans le vol descendant, au contraire, la pesanteur travaille avec l'oiseau pour accélérer le vol ; dans le planement descendant, les battements d'ailes s'arrêtent même tout à fait : la pesanteur agit seule alors et fait glisser l'oiseau sur l'air, comme sur un plan incliné. Plus la descente s'approche de la verticalité, plus

elle est rapide: la chute foudroyante du Faucon est de ce genre. L'oiseau serre alors les ailes contre le corps, pour donner le moins possible de résistance à l'air, et laisser la pesanteur produire librement l'accélération[1].

Il semble assez vraisemblable qu'un oiseau, si rien ne le force à presser son allure, doit faire un travail constant, soit dans le vol horizontal, soit en montant ou en descendant[2]. S'il en était ainsi, on aurait, dans les variations de la vitesse du vol, un contrôle des mesures de la résistance de l'air à la translation de l'oiseau, et du travail dépensé à vaincre cette résistance. En effet, si l'acte de s'élever à une certaine hauteur entraîne un ralentissement de la translation, parce que l'oiseau économise dans un sens le travail qu'il dépense dans un autre, on pourrait considérer comme égales les quantités de travail produites, en plus par l'effet de l'ascension de l'oiseau, et en moins par l'effet de sa diminution de vitesse. La mesure du travail de montée est fort simple, puisque c'est le poids de l'oiseau multiplié par la hauteur à laquelle il s'est élevé; on estimerait facilement, par cela même, le travail correspondant à la diminution de vitesse observée.

Les mêmes remarques s'appliquent à l'accroissement de vitesse dans le vol descendant. Mais, pour les mesures de hauteur et de vitesse, l'observation ne suffit pas; il faudra recourir à quelque méthode susceptible de précision (§ 196).

§ 203. Travail relatif des grands et des petits oiseaux. — On a observé que le vol ascendant, qui est évidemment le plus pénible de tous, n'est guère pratiqué que par les petits oiseaux et pendant un temps assez court. Le Pigeon le soutient quelques secondes seulement.

Mais, dans le vol de longue haleine, les grands oiseaux ne

1. Un oiseau qui fuit en descendant et veut distancer son ennemi ménage sa chute et suit une ligne faisant avec l'horizon un angle assez aigu; mais alors il combine l'action de ses ailes avec celle de la pesanteur : c'est le vol *à tire d'ailes*.

2. Un homme à son allure normale ralentit toujours sa marche lorsque le terrain monte, et l'accélère quand le terrain descend.

s'élèvent que sous un angle très aigu : le Faucon, d'après Huber, ne fait pas de carrières à plus de 20° d'inclinaison; le plus souvent, c'est l'angle de 10° qui correspond au rapport de sa vitesse à son ascension. L'Aigle s'élève sous un angle plus faible encore, lorsque le vent ne lui prête pas son aide.

Les petits oiseaux seraient-ils donc relativement plus forts que les grands ? Beaucoup d'auteurs l'ont pensé, mais sans en donner de preuves[1].

Ce que l'on sait de la physiologie des muscles porte à croire, au contraire, que le travail d'un oiseau est proportionnel à son poids. C'est même cette proportionnalité qui rend compte des différences de fréquence qu'on observe dans les battements des ailes chez les grands oiseaux et chez les petits (§ 20).

En Allemagne, Helmholtz, Müllenhoff, Strasser ont fait, sur le travail de l'oiseau, des calculs dont je n'ai pu avoir qu'une connaissance fort imparfaite, mais pour lesquels manquaient visiblement les données expérimentales sur la nature des mouvements qui se produisent dans le vol.

Helmholtz et Müllenhoff ont étudié l'influence du poids de l'oiseau sur la valeur relative du travail qu'il doit dépenser dans le vol. Pour Helmholtz[2], l'accroissement de la taille

1. Dans son intéressant travail, Goupil (*loc. cit.*, p. 25) a étudié, au point de vue mécanique, le rendement comparatif de deux moteurs semblables, mais de dimensions différentes. Il arrive à conclure que le travail est proportionnel au cube des dimensions linéaires des machines ou à leurs poids ; mais ce rendement ne se produit qu'accidentellement et quand les machines épuisent la vapeur en réserve. En marche courante, il faut tenir compte de la génération plus ou moins rapide de cette vapeur ; or comme cette génération dépend de la surface de chauffe, elle n'est proportionnelle qu'au carré des dimensions des deux machines.

On ne saurait, à mon avis, imposer cette restriction au travail des moteurs animés. Ce travail se produisant dans chaque cellule des muscles est proportionnel au nombre de ces cellules, c'est-à-dire au poids des muscles eux-mêmes et, pour des oiseaux semblables, proportionnel à leurs poids.

2. Helmholtz considérant l'accroissement linéaire λ des dimensions d'un oiseau admet que le poids de l'animal doit croître d'une quantité proportionnelle à λ^3, mais que le travail nécessaire à la propulsion doit, toutes choses égales d'ailleurs, augmenter proportionnellement à $\lambda^{\frac{7}{2}}$.

serait une condition défavorable. Müllenhoff[1] voit, au contraire, dans l'augmentation de la taille des oiseaux une cause de diminution dans le travail nécessaire pour voler.

§ 204. **Pendant la remontée de l'aile, les muscles pectoraux font du travail négatif.** — Le grand muscle pectoral résiste, avons-nous dit, à la remontée de l'aile, mais cède en résistant. Ce muscle fait donc *du travail négatif;* il agit comme ceux d'un homme qui prenant un fardeau dans un endroit élevé le déposerait lentement à terre, en contractant continuellement des muscles, pour ralentir les effets de la pesanteur, mais en somme en cédant à cette force[2].

Le travail résistant a la même mesure que le travail impulsif: c'est l'effort multiplié par le chemin parcouru. Dans la remontée de l'aile, l'effort de l'air (égal au poids de l'oiseau) multiplié par la quantité dont se déplace verticalement son point d'application donne la mesure du travail. Sans spécifier exactement le centre d'action de l'air sous l'aile remontante, nous savons qu'il est plus rapproché du corps que dans la descente : assez voisin probablement du tiers interne de l'aile. Le travail négatif produit pendant la remontée de l'aile est donc plus faible que le travail positif effectué dans son abaissement.

En mécanique, le travail résistant que fait un ressort qu'on tend, un gaz que l'on comprime, un poids qu'on remonte, est susceptible d'être restitué plus ou moins complètement par la détente du ressort ou du gaz, ou bien par la descente du poids. Se produira-t-il quelque chose d'analogue quand le muscle grand

1. Müllenhoff, *Études sur le travail dépensé dans le vol*, considérant que si le poids et le travail moteur de l'oiseau croissent dans un même rapport, celui des cubes des dimensions linéaires, la résistance de l'air ne croît que dans le rapport du carré de ces dimensions. Il s'ensuit donc que les gros oiseaux, comme les gros navires, trouvent relativement moins de résistance à leur translation et dépensent moins de travail.

2. Un muscle qui s'allonge en résistant produit les mêmes actes intérieurs que s'il se raccourcissait: il acquiert une force élastique, absolument comme pour soulever un poids; seulement, cette force étant un peu moindre que la résistance qui lui est opposée, c'est cette résistance qui l'emporte, commande le sens du mouvement, et en règle la vitesse.

pectoral, tendu par la remontée de l'aile, frappera le coup suivant ?

Il est certain que le muscle tendu à l'avance se trouve dans *des conditions plus favorables* pour son action prochaine, mais le travail qu'il fait en se contractant est tout entier produit par sa contraction actuelle[1] ; il n'y a pas restitution d'une partie du travail fait par l'air sur l'aile remontante.

§ 205. **Tout le travail dépensé dans le vol ramé se produit pendant l'abaissement de l'aile.** — Une partie du travail produit dans l'abaissement de l'aile s'emmagasine sous forme de force vive, dans la masse de l'oiseau, et se dépense, pendant la phase passive de remontée de l'aile, pour soutenir le corps de l'oiseau par un mécanisme de cerf-volant.

Cette dépense de travail, avons-nous dit, n'est pas constante : elle tend vers un minimum qui est atteint quand les coups d'ailes ont perdu le plus possible de leur fréquence et de leur amplitude.

§ 206. **L'oiseau dépense-t-il du travail dans le vol plané et dans le vol à voile?** — Les anciens fauconniers, dit Mouillard[2], avaient observé que le Faucon qui cherche à *lier* sa proie par des passades successives ne dépensait pas de force dans cet exercice qui semble, à première vue, en exiger beaucoup. Ils

1. Un phénomène assez curieux se produit lorsqu'on exécute un certain nombre de sauts sur place, en déployant à chaque fois toute la force de ses jambes. Si l'on observe avec soin le niveau auquel la tête s'élève à chaque fois, on constate que le premier saut est toujours moins haut que les ressauts qui le suivent.

Je pensai d'abord que l'excès de hauteur des ressauts tenait à la restitution d'une partie du travail emmagasiné dans les muscles extenseurs, au moment où ils amortissent la chute sur les pieds. Mais j'ai rejeté cette idée ; il me semble plus naturel d'admettre que l'avantage des ressauts tient à ce que, pour les produire, les muscles qui ont dû amortir les chutes préalables partent d'un degré de tension plus fort que celui qu'ils présentent au début du premier saut, où ils ne faisaient que soutenir le poids du corps dans la position accroupie. Il se passe là quelque chose d'analogue à ce qu'on observe dans la chiquenaude. La contraction de l'extenseur du doigt, un instant retenue, produit par sa détente brusque un choc violent qu'il serait impossible d'obtenir autrement, même par l'extension la plus énergique du doigt.

2. Mouillard, *loc. cit.*, p. 219.

s'en étaient assurés en étudiant la respiration de l'oiseau qui n'est presque pas accélérée, ou qui, en tout cas, l'est beaucoup moins que par des battements d'ailes continués pendant quelques minutes.

Les fauconniers pensaient que le violent courant d'air au milieu duquel l'oiseau venait de se trouver l'avait rafraîchi. La vérité, c'est que l'oiseau venait d'accomplir extrêmement peu de travail mécanique.

Puisque des appareils inertes, ayant une forme analogue à celle de l'oiseau et convenablement équilibrés, glissent dans l'air et se transportent à de grandes distances relativement à la hauteur perdue, ces actes, qui sont exactement ceux du vol plané, montrent bien que ce genre de vol n'exige aucune dépense de travail : c'est la pesanteur seule qui travaille dans ce cas, puisque l'appareil perd de la hauteur à mesure qu'il avance.

Le vol à voile est essentiellement constitué par une série de planements dans lesquels la force du vent est la source de travail (§ 189). Ici encore, l'oiseau n'a, théoriquement, rien à dépenser puisqu'il ne fait guère que d'*obscurs mouvements* destinés à changer la position de son centre de gravité.

Mais, dans le vol plané comme dans le vol à voile, l'oiseau tient ses ailes déployées et appuyées sur la résistance de l'air, de manière à soutenir tout le poids de son corps. Il est dans la position d'un athlète qui, les bras étendus, rigides et reposant sur deux fûts de colonnes, soutiendrait ainsi tout le poids de son corps. Dans ce cas aussi, il n'y aurait aucun travail fait, extérieurement du moins[1], puisque le poids du corps ne subirait aucun déplacement ; mais on s'imagine aisément quel effort énorme serait développé dans cet acte, et quelle fatigue s'ensuivrait.

L'oiseau, qu'il plane ou qu'il vole à voile, fait un effort du même genre : il soutient le poids de son corps sur deux appuis latéraux qui sont les centres de pression de l'air sous ses ailes. S'il

1. Dans une telle immobilité, l'action du vent a sa résultante au centre de la surface, et par conséquent vers la partie interne de l'aile.

est vrai que, dans le vol sans coups d'ailes, ces centres de pression sont beaucoup plus rapprochés du corps que dans le vol ramé, l'effort du grand pectoral n'en est pas moins très grand[1]. Il sera bien intéressant de rechercher si les muscles pectoraux des oiseaux voiliers n'ont pas quelque particularité, dans leur structure ou dans leur fonction, qui les rende plus aptes à soutenir les efforts prolongés.

1. Haughton appelle travail statique, celui qui se produit à l'intérieur du muscle pour lui donner un certain degré de force élastique capable de résister à un effort extérieur.

CALCUL

DES

FORCES MISES EN JEU DANS LE VOL DES OISEAUX

Par M. Ch.-M. DE LABOURET.

---

1. — Préambule.

Les calculs qui suivent ont été faits d'après les relevés opérés sur deux épreuves photochronographiques, obtenues par M. Marey à la station physiologique (annexe du Collège de France).

Ces épreuves avaient été fournies par un appareil photographique, muni d'un obturateur formé d'un disque tournant et faisant dix tours à la seconde, qui était percé de cinq fenêtres équidistantes : l'image d'un oiseau volant devant l'appareil vient donc se fixer sur la plaque, chaque fois qu'une fenêtre passe devant l'objectif, soit tous les cinquantièmes de seconde à peu près (fig. 1).

2. — Appréciation de la précision dans la mesure des temps.

La plaque sensible étant, dans l'appareil employé, placée tout près du disque tournant, on peut admettre que l'image de l'oiseau

vient se former sur le disque même ; cette hypothèse n'a pour but que de simplifier le calcul des intervalles de temps séparant deux poses successives.

Vu le peu de largeur des fenêtres FF, et leur vitesse de passage devant la plaque, on peut aussi les réduire à de simples trous distribués sur les cinq rayons équidistants, 01, 02, 03, 04, 05 (fig. 1).

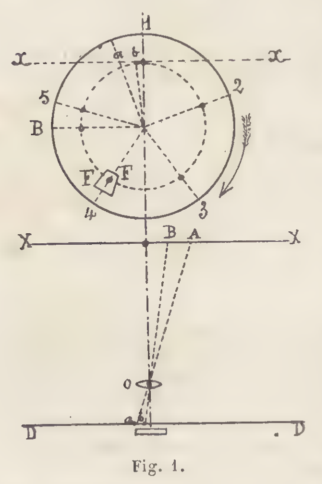


Fig. 1.

Pendant l'expérience, l'oiseau se déplace sur une ligne XX parallèle au disque. Si l'on suppose qu'il soit en A, au moment où une image s'est formée en *a*, la droite A*a* passe par le centre de l'objectif. A la pose suivante, l'oiseau est en B et l'image se forme en *b* sur le prolongement de la ligne BO. En reportant les points *a* et *b* sur la ligne *xx* image de la droite XX, et joignant le point *a* au centre du disque, on a suivant OA la position de la fente, qui a servi à la formation de la première image, au moment de la production de celle-ci. A ce moment la fente qui doit servir à la formation de l'image suivante *b* était donc dirigée suivant OB, faisant avec OA $\frac{1}{5}$ de circonférence, et l'angle dont on a tourné le disque entre les moments où les images *a* et *b* ont été fixées est B*ob*. Lorsque la fenêtre marche de manière qu'au moment où elle passe devant l'objectif elle se meuve dans le même sens que l'image de l'oiseau sur la plaque, il est visible que l'angle B*ob* est plus grand qu'un cinquième de circonférence ; il est plus petit lorsque la fenêtre et l'image marchent en sens contraires. Les intervalles de temps qui séparent les images successives sont donc plus grands ou plus petits que $\frac{1}{50^e}$ de seconde selon le cas.

La mesure des temps ayant une grande importance au point de vue de l'exactitude de la mesure des forces, il convient d'apprécier l'erreur commise.

Soit V la vitesse de l'oiseau par seconde, et $\left(\frac{1}{50}+\varepsilon\right)$ le temps qui sépare la production de deux images successives, on a :

$$AB = V\left(\frac{1}{50}+\varepsilon\right),$$

et la figure donne évidemment

$$ab = AB \times r,$$

r étant le rapport de réduction des dimensions de l'image aux dimensions réelles de l'objet, ou bien

$$ab = Vr\left(\frac{1}{50} + \varepsilon\right).$$

Vu les grandes dimensions du disque, on peut regarder ab comme mesurant la différence des deux angles Bob et Boa sur la figure 1. La vitesse de rotation du disque est

$$2\pi \times 10.$$

Pendant que l'image se transporte de a en b, le disque a tourné de l'angle Bob, cet angle est donc égal à

$$2\pi \times 10 \times \left(\frac{1}{50} + \varepsilon\right),$$

et en appelant d la distance du milieu des fenêtres au centre du disque, la longueur de l'arc $b'b$ est

$$2\pi \times 10 \left(\frac{1}{50} + \varepsilon\right) \times d.$$

L'arc $b'a$ a pour longueur

$$\frac{2\pi}{5}\, d.$$

La différence ab est donc

$$2\pi \times 10 \left(\frac{1}{50} + \varepsilon\right) d - \frac{2\pi}{5}\, d = 20\,\pi\varepsilon d.$$

En égalant les deux valeurs de ab, on a

$$20\,\pi\varepsilon d = Vr\left(\frac{1}{50} + \varepsilon\right),$$

d'où on peut tirer la valeur de l'erreur, commise sur les intervalles des poses successives,

$$\varepsilon = \frac{0.02\,\mathrm{V}r}{20\,\pi d - 0{,}02\,\mathrm{V}r} = \frac{1}{\dfrac{20\,\pi d}{0.02\,\mathrm{V}r} - 1} = \frac{1}{\dfrac{1000\,\pi d}{\mathrm{V}r} - 1}.$$

Pour l'appareil employé, la distance d des fenêtres au centre du disque était d'environ $0^{\mathrm{m}},20$. Le rapport de réduction était d'à peu près 1/60.

L'erreur ε commise était donc

$$\varepsilon = \frac{1}{\dfrac{37\,700}{\mathrm{V}} - 1} \quad \text{ou} \quad \frac{1}{125 \times 50} \text{ pour } \mathrm{V} = 6 \text{ mètres.}$$

Pour qu'elle devînt appréciable par rapport à la valeur approchée de l'intervalle de deux poses $\left(\frac{1^{\mathrm{s}}}{50}\text{ environ}\right)$, il faudrait qu'elle atteigne au moins $\frac{2}{100^{\mathrm{es}}}$ de cette valeur ou le 2500ᵉ de seconde. La vitesse de l'oiseau devrait être d'au moins 15 mètres. C'est plus du double des vitesses mesurées dans l'expérience; on peut donc en toute sécurité regarder $\frac{1}{50^{\mathrm{e}}}$ de seconde, comme la mesure à $\frac{1}{125^{\mathrm{e}}}$ près des intervalles des poses successives, si les fenêtres se présentent elles-mêmes bien exactement à $\frac{1}{50^{\mathrm{e}}}$ de seconde d'intervalle devant l'objectif. Les vitesses qu'on déduira des mesures ne pourront donc être entachées que d'une erreur insignifiante par suite des déplacements de l'objet, mais à condition que la rotation du disque soit rigoureusement connue, et de plus cette erreur a le même sens pendant la durée d'une même expérience.

A côté de cette erreur de sens constant, on peut en avoir une autre provenant de la marche du disque, qui peut faire soit un peu moins, soit un peu plus de 10 tours à la seconde; les irrégularités de rotation du disque pendant un tour entier peuvent aussi rendre inégaux les intervalles des passages successifs de chacune des cinq fenêtres devant l'objectif. Mais les moyens employés pour régulariser le mouvement de l'appareil, constatation de la vitesse augulaire du disque pendant une longue période par l'inscription simultanée des tours du disque et des vibrations d'un diapason taré à l'avance, emploi d'un ressort à

une tension constante pendant l'expérience, grande masse donnée au disque et emploi d'un régulateur de vitesse très sensible, permettent d'espérer, et même d'affirmer, que l'erreur constante sur la marche du disque est moindre que $\frac{1}{100^e}$ de tour en une seconde, soit pour chaque intervalle $\frac{1}{1000^e}$ de sa valeur, et que les erreurs de signe variable provenant des irrégularités de marche sont au plus égales à $\frac{1}{1000^e}$ de la valeur de l'intervalle Δt, qu'on suppose constant et égal à $\frac{1}{50^e}$ de seconde dans l'expérience. En supposant positives les erreurs de sens constant, l'erreur totale commise sur la mesure des intervalles successifs est donc

$$d.\Delta t = \left(\frac{1}{125} + \frac{1}{1000} \pm \frac{1}{1000}\right)\Delta t = (0,009 \pm 0,001)\,\Delta t.$$

3. — Évaluation de la précision dans la mesure des espaces parcourus.

L'oiseau photographié portait sur la tête une petite boule brillante, dont l'image sur la plaque était un point de faible diamètre et de contour apparent bien net. Pour permettre de se rendre compte des déplacements de l'oiseau, une règle divisée en huitième, quart et moitié de mètre était placée parallèlement à la direction dans laquelle était dirigé le vol de l'oiseau, et au-dessus de celui-ci. La réduction du mètre se faisait donc dans la même proportion que celle des dimensions de l'oiseau ou des chemins parcourus par lui. La règle étant de plus placée parallèlement à la plaque sensible et maintenue horizontale, son image sur la plaque fournissait la direction représentant les horizontales du plan dans lequel était produit le vol de l'oiseau. La plaque étant elle-même placée dans l'appareil de manière que son bord supérieur soit sensiblement horizontal, l'image du mètre devait être parallèle à ce bord, ce qui permettait de vérifier après coup la disposition donnée aux instruments.

Dans le cas où la règle divisée n'est pas absolument parallèle à la plaque sensible, son image est un peu plus petite qu'elle ne devrait être. En cherchant à évaluer l'erreur qu'on peut ainsi commettre, il faut tenir compte des dimensions des appareils employés. La plaque sensible avait environ 8 centimètres dans sa plus grande dimension ; le

foyer de l'objectif était à peu près à 10 ou 12 centimètres de la plaque. L'angle d'ouverture du champ était donc d'environ 21°,45', dont la tangente est égale à $\frac{4}{10}$.

Le mètre se trouvait placé à 61 fois environ la distance focale, soit au moins à $6^m,10$. On peut supposer qu'il faisait un angle O très petit avec le plan TMN, auquel on rapporte les objets photographiés, et qui est exactement parallèle à la plaque (fig. 2).

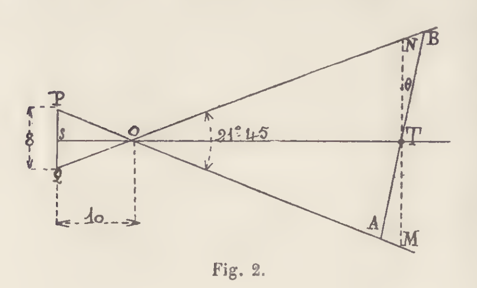


Fig. 2.

En prenant sur la plaque la longueur PQ comme image de AB, on attribue à cette ligne la longueur MN et on commet donc une erreur toujours négative.

$$AB - MN = TB - TN + TA - TM.$$

Il est facile de voir qu'on a

$$TM = TN = 61\,\frac{PQ}{2}$$

$$TB = OT\,\frac{\sin 21°45'}{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta - 21°45\right)} = OT\,\frac{\sin 21°45'}{\cos(21°45 + \theta)}$$

$$TA = OT\,\frac{\sin 21°45'}{\cos(21°45' - \theta)}$$

$$OT = 61\,\frac{PQ}{2\ \text{tg}\ 21°45'} = \frac{10}{4} \times 61 \times \frac{PQ}{2}.$$

Par conséquent, l'erreur y commise est

$$61\,\frac{PQ}{2}\left(\frac{10}{4}\,\frac{\sin 21°45'}{\cos(21°45' + \theta)} - 1 + \frac{10}{4}\,\frac{\sin 21°45'}{\cos(21°45' - \theta)} - 1\right).$$

En divisant les deux fractions par cos 21°,45' et remarquant que

$$\frac{\sin 21°45'}{\cos 21°45'} = \text{tg}\ 21°45' = \frac{4}{10}.$$

On a

$$\eta = 61\,\frac{PQ}{2}\left(\frac{\cos 21^\circ 45'}{\cos(21^\circ 45' + \theta)} - 1 + \frac{\cos 21^\circ 45'}{\cos(21^\circ 45' - \theta)} - 1\right).$$

En réduisant au même dénominateur, et employant les formules d'addition des lignes trigonométriques, il vient

$$\eta = 61\,PQ\,\sin\frac{\theta}{2}\left[\frac{\sin\left(21^\circ 45' + \frac{\theta}{2}\right)}{\cos(21^\circ 45' + \theta)} - \frac{\sin\left(21^\circ 45' - \frac{\theta}{2}\right)}{\cos(21^\circ 45' - \theta}\right].$$

Pour l'angle θ très petit, on peut mettre sans erreur cette expression sous la forme approchée

$$\eta = 61\,PQ\,\frac{\theta^2}{2}.$$

Si PQ est l'image de AB, la longueur MN ou 61 PQ est sensiblement égale à AB. On a calculé le rapport de réduction en mesurant PQ et prenant le rapport

$$\frac{MN}{PQ}$$

il aurait fallu prendre

$$\frac{AB}{PQ} \quad \text{ou} \quad \frac{MN + \eta}{PQ} \quad \text{ou} \quad 61 + \frac{\eta}{PQ}.$$

On a donc fait une erreur en moins

$$\frac{\eta}{PQ} = 61\,\frac{\theta^2}{2}$$

sur l'évaluation du rapport de réduction.

Si le vol de l'oiseau n'est pas lui non plus rigoureusement parallèle à la plaque, les espaces parcourus seront réduits autrement qu'il ne conviendrait. Soit x la longueur d'un déplacement mesuré sur la plaque. On lui attribue la valeur $61\,x$; si α est l'angle du vol avec la plaque, on commet une erreur en moins ou en plus,

$$61\,x\,\frac{\alpha^2}{2}$$

provenant de l'ignorance de l'obliquité du vol. Mais de plus, on devrait employer, au lieu du rapport de réduction 61, le rapport

$$61\left(1+\frac{\theta^2}{2}\right).$$

La vraie valeur du déplacement serait donc au plus

$$61\left(1+\frac{\theta^2}{2}\right)x\left(1+\frac{\alpha^2}{2}\right).$$

On commet donc une erreur maxima, dont la valeur est donnée par l'expression $61\,x\,\frac{\alpha^2+\theta^2}{2}$, en négligeant le dernier terme du développement $61\,x\,\frac{a^2\theta^2}{4}$, infiniment petit du second ordre.

Ainsi en définitive, l'erreur commise sur un déplacement réel de X l'oiseau, α étant l'angle de la direction du vol avec la plaque et θ celui de la règle divisée avec cette même plaque, est toujours plus petite que

$$X\,\frac{\alpha^2+\theta^2}{2}.$$

Si l'on considère qu'un angle de 6° est déjà appréciable, et correspond à un arc égal à peu près à $\frac{1^R}{10}$, on peut admettre que l'arc θ sera toujours plus petit que $\frac{1}{10}$. On peut de même admettre que l'arc α est plus petit que $\frac{1}{5}$. L'erreur commise dans l'évaluation des déplacements, quand on ne tient pas compte de l'obliquité possible entre la plaque et les directions représentées, est donc certainement plus faible, pour un déplacement X que

$$\frac{1}{2}\,X\left[\frac{1}{25}+\frac{1}{100}\right]=X\,\frac{5}{200}$$

ou

$$0{,}025\ X$$

et ses plus grandes valeurs sont négatives.

Pour mesurer les déplacements sur la plaque, soit horizontaux soit

verticaux, on a employé un appareil micrométrique donnant le centième de millimètre.

Cet appareil (fig. 3) se compose d'un microscope M, monté sur un premier chariot C, coulissant dans un deuxième chariot B sous l'action d'une vis à tambour divisé T. Le chariot B est mobile dans une direction perpendiculaire à la vis T sous l'action d'une seconde vis à tambour

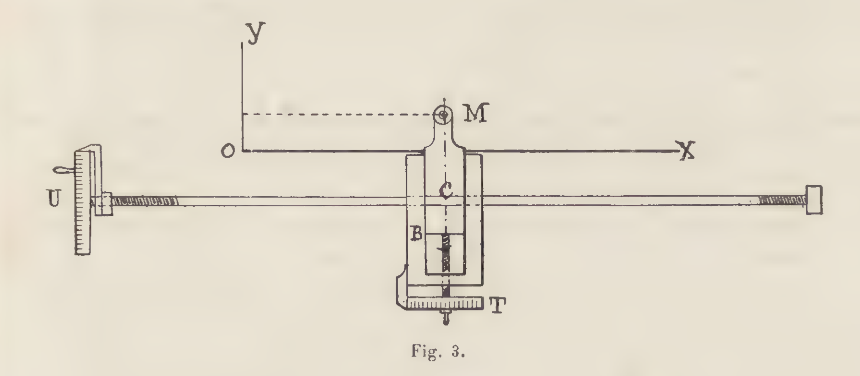


Fig. 3.

divisé U. Si les tambours sont réglés de manière à marquer 0, lorsque le microscope est pointé sur un point O de la plaque pris pour origine, les lectures du tambour U et du tambour T feront connaître respectivement l'abscisse et l'ordonnée d'un point M de la plaque par rapport à deux axes OX et OY respectivement parallèles aux vis U et T, lorsque le microscope sera pointé sur le point M de la plaque.

L'appareil permettant de lire les centièmes de millimètre, on peut admettre que les déplacements sont lus sur la plaque à $0^{m},000005$ près. Les déplacements réels sont donc lus à

$$0^{m},000005 \times 60 = 0^{m},0003$$

ou trois dixièmes de millimètre près en plus ou en moins.

En ne tenant pas compte de l'erreur provenant de l'hypothèse que la direction de l'image du mètre représente l'image d'une horizontale de l'espace parallèle à la plaque, erreur qu'on pourrait sans peine évaluer, mais qui est excessivement petite par rapport aux précédentes, on voit que l'erreur commise sur un déplacement E, soit horizontal, soit vertical, est au plus

$$d.\mathrm{E} = -0,025\,\mathrm{E} \pm 0^{m},0003.$$

4. — Calcul des vitesses et des forces.

Les relevés micrométriques permettent de dresser des tables des déplacements du point de repère placé sur le corps de l'oiseau, soit dans le sens horizontal, soit dans le sens vertical correspondant aux 50es successifs de la pose.

A l'aide de ces deux tables, on peut, en portant les temps sur un axe horizontal et les espaces dans une direction rectangulaire, obtenir les deux tracés A et B, qui représentent (voir les courbes à la fin de la note) les déplacements horizontaux ou verticaux de l'oiseau compté à partir d'une origine commune, par exemple la position occupée par le repère au moment de la formation de la première image ; ce moment étant pris pour origine des temps.

Dans chacun des cinquantièmes de seconde successifs, les composantes horizontales et verticales de la vitesse de l'oiseau ont pour valeur moyenne le rapport de l'accroissement de l'espace à l'accroissement du temps.

$$V_x = \frac{\Delta . X}{\Delta . t}$$

$$V_y = \frac{\Delta . Y}{\Delta . t}.$$

En formant les différences successives des espaces relevés, et divisant ces différences par l'intervalle de temps uniforme

$$\Delta t = \frac{1^{sec}}{50}$$

on formera une table des vitesses successives, prises par l'oiseau, soit horizontalement soit verticalement, pendant chacun des intervalles considérés. En portant ces valeurs sur les ordonnées correspondant aux milieux des portions de la ligne des abscisses, représentant les temps, on formera deux tracés courbes C et E, représentant la succession des vitesses en fonction des temps.

Les vitesses ainsi obtenues sont séparées par un intervalle constant de $\frac{1^{sec}}{50}$. En prenant leurs différences successives, et divisant par l'intervalle de temps qui sépare leur production, on aura les accélérations successives prises par l'oiseau

$$J_x = \frac{\Delta . V_x}{\Delta . t}$$

$$J_y = \frac{\Delta . V_y}{\Delta . t}$$

et il suffira de multiplier ces valeurs par la masse M de l'oiseau pour avoir les forces, auxquelles il est soumis horizontalement ou verticalement. En portant ces valeurs sur les ordonnées des espaces primitivement tracés, on aura deux courbes E et F, représentant les variations des composantes horizontales et verticales de la force, à laquelle est soumis l'oiseau, en fonction des temps ; P étant le poids de l'oiseau,

$$F_x = \frac{P}{g} \frac{\Delta . V_x}{\Delta . t}$$

$$F_y = \frac{P}{g} \frac{\Delta . V_y}{\Delta . t}$$

Pour l'oiseau expérimenté, le poids était de $0^k,623$ et la masse $\frac{P}{g}$ de 0,0637.

5. — Appréciation de la précision obtenue dans la mesure des vitesses et des forces.

On a vu plus haut quelles étaient les valeurs des erreurs maxima pouvant être commises dans la mesure des espaces et des temps.

$$d.E = -0{,}025\,E \pm 0^m{,}0003$$

$$d.\Delta t = (0{,}009 \pm 0{,}001)\,\Delta t.$$

On en déduit

$$d.\Delta.E = -0{,}025\ \Delta.E \pm 0{,}0006$$

et, suivant la formule différentielle

$$d.\frac{A}{B} = \frac{d.A}{B} - \frac{A}{B}\frac{d.B}{B}$$

$$d.V = d.\frac{\Delta.E}{\Delta.t} = -0{,}025\frac{\Delta.E}{\Delta.t} \pm \frac{0{,}0006}{\Delta t} - \frac{\Delta.E}{\Delta.t}(0{,}009 \pm 0{,}001)$$

ou

$$d.V = -0{,}034\,V \pm (0{,}03 + 0{,}001\,V).$$

Par suite

$$d.\Delta.V = -0{,}034\ \Delta.V \pm (0{,}06 + 0{,}002\,V)$$

et

$$d.F = 0{,}064\,d.\frac{\Delta.V}{\Delta.t}$$

$$= \left[-0{,}034\frac{\Delta.V}{\Delta.t} \pm \frac{0{,}06 + 0{,}002\,V}{\Delta.t} - \frac{\Delta.V}{\Delta.t}(0{,}009 \pm 0{,}001)\right] 0{,}064,$$

ou

$$d.F = 0,043\,F \pm (0^{k},192 + 0,0064\,V + 0,001\,F).$$

Les vitesses sont donc obtenues avec une approximation bien suffisante; car en supposant

$$V = 10^{m}$$

valeur supérieure à celles que l'oiseau a prises dans les expériences, on voit que les vitesses peuvent être entachées d'une erreur systématique au plus égale à

$$0^{m},34$$

et d'une erreur accidentelle au plus égale à

$$\pm\, 0^{m},04.$$

Dans le cas le plus défavorable, la valeur calculée pour la vitesse serait erronée de

$$0^{m},38.$$

On voit de plus que l'erreur systématique, qui est la plus forte pour les grandes valeurs de l'erreur, est proportionnelle à la vitesse; il en résulte que, malgré les erreurs qui peuvent être commises, la forme de la courbe des vitesses ne sera pas modifiée et qu'en particulier on pourra compter sur une grande précision dans l'évaluation des temps, pour lesquels la vitesse devient maximum ou minimum ou bien s'annule.

Il n'en est pas de même de la mesure des forces. L'erreur systématique est encore faible et moindre que le $\frac{1}{20}$ de la force mesurée; mais l'erreur accidentelle contient un terme constant assez fort et égal à 200 grammes. Les autres termes peuvent atteindre une valeur de 50 grammes. Il y a donc à craindre sur la mesure des forces une erreur accidentelle de 250 grammes. La plus grosse part de cette erreur, qui est elle-même dominante, dans l'expression de l'erreur totale, provient de l'erreur accidentelle faite sur la mesure des espaces dans le relevé micrométrique.

En effet, bien que l'appareil micrométrique donne une extrême précision, la nécessité de multiplier les espaces par un coefficient très grand représentant le coefficient de réduction de l'image photographique détruit presque tout l'effet de la précision obtenue. Il en ré-

sulte une erreur accidentelle, faible il est vrai, $0^m,0003$, sur la mesure des espaces, mais qui est multipliée par 100, quand on passe aux vitesses, puis par 6,40 quand on passe aux forces.

Il en résulte qu'avec une réduction 6 fois moins forte, en réduisant au 10e seulement, on aurait pu estimer les forces à 70 ou 80 grammes près, déduction faite de l'erreur systématique. Comme celle-ci, proportionnelle aux forces, n'apporte pas de modification dans la courbe des forces en fonction des temps, on aurait la courbe des forces et la loi de leurs variations avec une approximation bien suffisante pour la pratique.

Il y a donc intérêt pour les expériences futures à obtenir des images photographiques aussi grandes que possible.

Les erreurs sur la mesure du travail sont moins importantes. Le travail étant en effet égal à l'intégrale

$$\mathrm{T} = \int_{t_1}^{t_2} \mathrm{F}\Delta.\mathrm{E},$$

on voit que les erreurs accidentelles doivent se détruire au moins en partie. La mesure du travail ne sera donc entachée que d'une erreur systématique. On a

$$d.\mathrm{T} = d\int_{t_1}^{t_2} \mathrm{F}\Delta.\mathrm{E} = \int_{t_1}^{t_2} (d.\mathrm{F} \times \Delta.\mathrm{E} + \mathrm{F}d.\Delta.\mathrm{E})$$

$$d.\mathrm{T} = -0{,}068\,\mathrm{T} + \Sigma(\pm 0{,}2\,\mathrm{E} \pm 0{,}0006\,\mathrm{F}).$$

En admettant que les erreurs accidentelles se détruisent sensiblement, l'erreur systématique à craindre sur la mesure du travail serait d'environ les $\frac{7}{100}$ du travail mesuré.

6. — Résumé de la discussion.

En définitive, on voit que la méthode chronophotographique permet d'obtenir avec une approximation très suffisante la succession des vitesses aux différents instants du vol de l'oiseau.

La mesure des forces peut être notablement améliorée, si l'on peut obtenir des images suffisamment grandes, et celle du travail est presque aussi exacte que la mesure des vitesses.

Pour les expériences, qui ont donné lieu aux calculs qui suivent, il n'y a donc lieu d'accorder qu'une confiance limitée aux valeurs obtenues pour les forces et les travaux. Toutefois il y a lieu de remarquer

que les valeurs calculées pour les erreurs l'ont été en se plaçant dans des cas très défavorables et que très certainement les erreurs de mesure sont restées bien au-dessous des limites assignées.

Cette conclusion est du reste confirmée par l'examen des courbes, qui présentent des accidents d'une régularité frappante pendant les périodes successives du vol.

7. — Correction due au mouvement du centre de gravité général de l'oiseau par rapport au point de repère.

Les méthodes de calculs exposées plus haut n'ont été appliquées aux relevés micrométriques qu'après avoir fait subir aux valeurs des déplacements horizontaux et verticaux, une correction nécessitée par le fait que les forces auxquelles est soumis l'oiseau doivent être déduites du mouvement du centre de gravité et non du mouvement d'un point de repère.

Le corps de l'oiseau se compose en effet de deux parties mobiles l'une par rapport à l'autre. La première partie peut être considérée comme sensiblement indéformable et comprend le corps même de l'oiseau, abstraction faite des ailes ; la deuxième partie se déforme au contraire constamment pendant le vol et se compose de l'ensemble des deux ailes. Chacun de ces systèmes pouvant être regardé comme symétrique par rapport au plan vertical médian de l'oiseau, les centres de gravité de chacun d'eux, ainsi que le centre de gravité de la masse totale de l'oiseau, sont constamment contenus dans un plan vertical mobile, qui partage l'oiseau en deux parties égales.

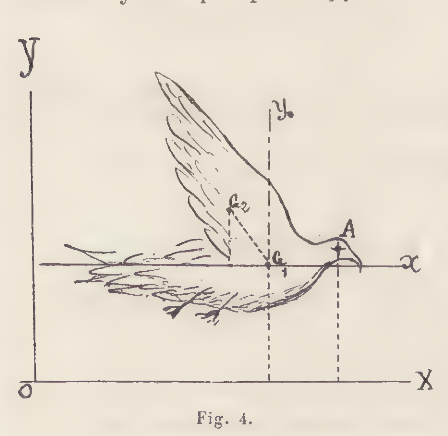


Fig. 4.

Dans les deux expériences calculées, le vol ayant été sensiblement rectiligne, on peut admettre que le plan médian de l'oiseau n'a pas changé de position dans l'espace pendant le vol.

Soit (fig. 4) OX et OY deux axes de coordonnées tracés dans ce plan, et, à un moment donné, A la position du repère choisi sur la partie indéformable du corps de l'oiseau,

G_1, le centre de gravité de la partie indéformable; l'examen des images de l'oiseau montre que, pendant le vol rectiligne, l'orientation du corps reste sensiblement constante; le corps prend donc un mouvement de translation, et tous les points de la partie indéformable décrivent des trajectoires parallèles. La courbe relevée pour le point de repère A peut donc être attribuée au centre de gravité G_1, de la partie indéformable. Les relevés micrométriques opérés peuvent être considérés comme ayant été obtenus par des visées sur le centre de gravité G_1.

Mais pendant le vol, les ailes s'abaissent et s'élèvent, se portent en avant et en arrière par rapport au corps.

Soit p le poids de la partie indéformable, p_2 le poids du système des deux ailes, x_1 et y_1 les coordonnées du centre de gravité de la partie indéformable par rapport aux axes OX et OY, et a et b les coordonnées du centre de gravité G_2 des ailes par rapport à deux axes mobiles entraînés par le centre de gravité G_1 de la partie indéformable.

On sait que le centre de gravité du corps de l'oiseau aura pour coordonnées

$$X = x_1 + \frac{p_2}{p_1 + p_2} a$$

$$Y = y_1 + \frac{p_2}{p_1 + p_2} b.$$

Aux relevés micrométriques, x_1 et y_1, il faut donc ajouter les corrections

$$\frac{p_2}{p_1 + p_2} a, \qquad \frac{p_2}{p_1 + p_2} b$$

pour obtenir les coordonnées du centre de gravité général de l'oiseau, qui seules permettent d'en calculer exactement les vitesses et les accélérations.

8. — Valeur de la correction à apporter aux déplacements du repère.

Il reste donc à déterminer quelles sont, à chaque instant du vol, les positions du centre de gravité général de l'oiseau par rapport au centre de gravité de la partie indéformable.

Pour cela, si l'on examine ce qui se passe pendant un coup d'aile entier de durée T, on s'aperçoit facilement que l'on peut diviser cette

période en deux parties principales — les deux phases d'abaissement et de relèvement des ailes, et qu'au commencement et à la fin de chaque période les parties osseuses des ailes paraissent faire à peu près le même angle au-dessus et au-dessous de la direction du vol.

On peut donc admettre, sans grande erreur, que par rapport au centre de gravité de la partie indéformable du corps de l'oiseau, le centre de gravité de la masse mobile des ailes se déplace suivant une ligne droite gg, ou tout au moins suivant une courbe fermée très aplatie (fig. 5).

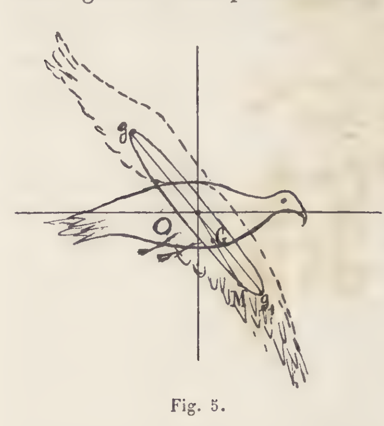


Fig. 5.

Le centre de gravité G du corps tout entier de l'oiseau se trouve constamment sur la droite qui joindrait le centre de gravité O de la partie indéformable au centre de gravité des ailes, et partagerait cette droite dans le rapport inverse des poids des deux parties du corps de l'oiseau. On voit donc que le centre de gravité G décrit autour du centre de gravité O de la partie indéformable une petite courbe semblable à la courbe gg_1, et qu'on peut sans grande erreur assimiler à une droite passant par le point O. Une expérience faite avec la planche de Borelli a montré que, de la position d'élévation à la position d'abaissement des ailes, le centre de gravité se déplaçait dans le corps de l'oiseau horizontalement de 15 millimètres, verticalement de 35 millimètres. En prenant pour origine des temps le moment où les ailes sont le plus haut possible et appelant T le temps nécessaire à un coup d'aile (abaissement et relèvement des ailes), il est facile de voir qu'on peut représenter le mouvement du centre de gravité général par rapport aux axes mobiles G_1x, Gy, au moyen des formules

$$\frac{p_2}{p_1+p_2}a = -0{,}0075 \cos \frac{2\pi}{T}\theta$$
$$\frac{p_2}{p_1+p_2}b = +0{,}0175 \cos \frac{2\pi}{T}\theta,$$

L'inspection des images de l'oiseau permet de déterminer les numéros d'ordre des images, qui correspondent aux débuts des coups d'ailes successifs. Il est facile d'en déduire la durée de chaque coup d'aile, et les corrections correspondantes à chaque image.

Il peut être quelquefois difficile d'apprécier le numéro de l'image qui correspond aux positions extrêmes des ailes. On peut contrôler les indications recueillies sur la plaque de la façon suivante.

Le corps de l'oiseau, abstraction faite des ailes, est soumis d'une part à la résistance de l'air, d'autre part aux tractions exercées sur lui par les ailes. On peut donc considérer comme un solide libre la partie invariable du corps de l'oiseau, à la condition d'appliquer au centre de gravité de cette partie les forces extérieures qu'on vient de citer. La vitesse apparente de l'oiseau dans un intervalle de temps très court sera donc minimum ou maximum, quand la résultante des forces extérieures sera nulle.

Or, au moment où les ailes arrivent près de leur maximum d'élévation, comme elles montent d'abord pour s'abaisser ensuite, il y a un moment où leur position par rapport au corps varie lentement; la réaction due à leur mouvement propre est très faible, ainsi que la pression exercée par l'air sur elles, puisque leur vitesse est très faible. La somme de ces deux actions constitue la traction totale qu'elles exercent sur la partie indéformable, et il faut y ajouter la résistance de l'air, sur le corps de l'oiseau, qui est toujours dirigée en sens contraire du mouvement que les deux forces précédentes font prendre au corps de l'oiseau, et qui est elle-même faible, vu la faible vitesse de translation du corps de l'oiseau, et ses formes particulières.

Il en résulte qu'au moment du maximum d'élévation des ailes, la partie indéformable de l'oiseau est soumise à deux forces contraires de la part de l'air et des ailes, forces toutes deux très petites et dont la différence doit s'annuler vers cet instant.

La vitesse de la partie indéformable du corps de l'oiseau passe donc par un minimum ou un maximum à la fin de l'élévation des ailes. Il est visible que c'est par un minimum, puisqu'avant ce moment l'oiseau travaille pour disposer ses organes en vue du coup d'aile suivant, pendant la première partie duquel seulement il pourra accélérer sa vitesse, soit horizontale, soit verticale.

On verrait de même qu'à la fin de l'abaissement, la vitesse du corps, abstraction faite des ailes, est maximum.

Les images de l'oiseau, et du point de repère qu'il porte, étant prises à des intervalles de temps égaux, les parcours successifs du point de repère pendant ce temps sont proportionnels aux vitesses de la partie indéformable.

Si l'on considère par exemple le troisième coup d'aile relevé sur la deuxième des plaques obtenues, on peut former le tableau suivant, à l'aide des déplacements successifs horizontaux du repère :

NUMÉROS de L'IMAGE.	DÉPLACEMENTS DU CORPS DE L'OISEAU Totaux mesurés.	DÉPLACEMENTS DU CORPS DE L'OISEAU Successifs pendant un intervalle entre deux jours.	TEMPS en DEMI-INTERVALLES de pose comptés à partir du maximum d'élévation.	OBSERVATIONS.
12	1136mm			
		100mm	0	Élévation maximum.
13	1236	....	1/2	
		101		
14	1337	....	3/2	
		101		
15	1438	....	5/2	
		109		
16	1547	....	7/2	
		110		
17	1657	....	9/2	
		116		
18	1773	....	11/2.........	Abaissement maximum.
		126		
19	1899	....	13/2	
		126		
20	2025	....	15/2	
		125		
21	2150	....	17/2	
		115		
22	2265	....	19/2	
		117		
23	2382	....	21/2	
		112		
24	2494	....	23/2	
		111	.... $T = 24/2$	Élévation maximum.
25	2605	....	25/2	
		112		
26	2717	....	27/2	
		120		
27	2837	....	29/2	

Il est facile de voir que la vitesse horizontale a été minimum, entre



Fig. 6.

les moments où ont été prises la 12e et la 13e image d'une part, la 24e et la 25e image d'autre part.

Dans chacun de ces intervalles, la vitesse a varié, comme l'indique la courbe ci-dessous, et il est naturel d'attribuer le minimum de vitesse à l'instant milieu de l'intervalle, où il s'est sûrement produit (fig. 6).

La durée totale T du coup d'aile se compose donc de $\frac{24}{2}$ intervalles, et les images successives se sont produites à la 1re, 3e, 5e, 21e, 23e des 24 parties égales, dans lesquelles on peut partager le temps total du coup d'aile.

Il suffit alors de donner au rapport $\frac{\theta}{T}$ les valeurs successives

$$\frac{1}{24} \quad \frac{3}{24} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad \frac{21}{24} \quad \frac{23}{24}$$

dans les formules

$$\frac{p_2}{p_1+p_2}\,a = -0{,}0075 \cos 2\pi \frac{\theta}{T}$$

$$\frac{p_2}{p_1+p_2}\,b = +0{,}0175 \cos 2\pi \frac{\theta}{T}$$

pour calculer immédiatement les corrections dues au mouvement du centre de gravité dans l'intérieur du corps de l'oiseau et correspondants aux cinquantièmes de secondes successifs.

9. — Résultats numériques des lectures.

Les deux tableaux suivants donnent les parcours horizontaux et verticaux observés dans deux expériences faites avec un goéland du poids de $0^{k},623$ mesurant de bec à queue $0^{m},500$ de longueur, dont l'envergure était de $1^{m},070$, et dont l'aile avait une surface d'environ $0^{m2},0642$ (6 décimètres carrés et demi environ).

PREMIÈRE PLAQUE

Vol sensiblement horizontal.

Longueur de l'image d'une règle de 2 mètres.................................. 32mm,60

Réduction des dimensions réelles par la photographie $\frac{2000}{32.60}$ ou....... 61,35

NUMÉROS des IMAGES.	TEMPS en SECONDES.	PHASES DU COUP D'AILE.	DÉPLACEMENTS DU POINT DE REPÈRE		DÉPLACEMENTS RÉELS DU CORPS DE L'OISEAU		CORRECTION DUE AU MOUVEMENT du centre de gravité.		DÉPLACEMENTS RÉELS DU CENTRE DE GRAVITÉ	
			Horiz.	Vertic.	Horiz.	Vertic.	Horiz.	Vertic.	Horiz.	Vertic.
			mm.	mm.	mm.	mm.	mm.	mm.	mm.	mm
		Milieu de l'intervalle précédent.					—7.5	+17.5		
1	0	1er coup d'aile. Abaissement des ailes.	0	0	0	0	—7.1	+16.4	—7.1	+ 16.4
2	0.02		1.65	—0.05	101.23	+ 3.07	—4.4	+10.1	96.8	+ 13.2
3	0.04		3.44	—0.14	211.04	+ 8.60	0	0	211.0	+ 8.6
4	0.06		5.31	—0.28	326.0	+ 17.19	+4.4	—10.1	330.4	+ 7.1
5	0.08		7.34	—0.03	450.0	+ 1.84	+7.1	—16.4	457.1	— 14.6
6	0.10	Relèvement des ailes.	9.24	+0.20	567.0	— 12.27	+7.1	—16.4	574.1	— 28.7
7	0.12		11.22	0.53	688.3	— 31.51	+4.4	—10.1	692.7	— 41.6
8	0.14		13.20	0.85	810.0	— 52.14	0	0	810.0	— 52.0
9	0.16		15.12	1.10	917.6	— 67.50	—4.4	+10.1	913.2	— 57.4
10	0.18		16.95	1.38	1039.9	— 84.70	—7.1	+16.4	1032.8	— 68.3
11	0.20	2e coup d'aile. Abaissement.	18.59	1.47	1140.5	— 90.20	—4.4	+10.1	1136.1	— 80.1
12	0.22		20.30	1.47	1245.0	— 90.20	0	0	1245.0	— 90.2
13	0.24		22.41	1.35	1375.0	— 82.80	+4.4	—10.1	1379.4	— 92.9
14	0.26		24.39	1.34	1496.3	— 82.20	+7.1	—16 4	1503.4	— 98.6
15	0.28	Élévation.	26.45	1.58	1623.0	— 96.90	+7.1	—16.4	1630.1	—113.3
16	0.30		28.62	1.79	1756.0	—109.70	+4.4	—10.1	1760.4	—119.8
17	0.32		30.80	1.96	1889.5	—120.24	0	0	1889.5	—120.2
18	0.34		32.97	2.13	2022.7	—130.50	—4.4	+10.1	2018.3	—120.4
19	0.36		35.09	2.17	2152.7	—132.70	—7.1	+16.4	2145.6	—116.3
20	0.38	3e coup d'aile. Abaissement.	37.09	2.51	2275.0	—153.80	—7.1	+16.7	2267.9	—137.1
21	0.40		38.90	2.76	2386.5	—169.50	—4.8	+11.2	2381.7	—158.3
22	0 42		40.90	2.73	2509.2	—168.2	—0.8	+ 1.9	2508.4	—166.3
23	0.44		42.93	2.61	2633.7	—161.0	+3.4	— 7.7	2637.1	—168.7
24	0.46		45.05	2.59	2764.0	—159.0	+6.5	—15.2	2770.5	—174.2
25	0.48		47.26	2.73	2899.4	—168.2	+7.5	—17.5	2006.9	—185.7
26	0.50	Élévation.	49.68	2.89	3048.0	—177.5	+6.5	—15.2	3054.5	—192.7
27	0.52		51.98	3.14	3189.0	—192.5	+3.4	— 7.7	3192.4	—200.2
28	0.54		54.29	3.38	3331.0	—207.5	—0.8	+ 1.9	3330.2	—205.6
29	0.56		56.57	3.35	3470.5	—218.0	—4.8	+11.2	3465.7	—206.8
30	0.58		58.69	3.71	3600.6	—227.5	—7.1	+16.7	3593.5	—210.8
31	0.60		60.75	3.91	3727.0	—240.0	—7.1	+16.4	3719.9	—223.6
32	0.62	4e coup d'aile. Abaissement.	62.80	3.90	3852.7	—239.5	—4.4	+10.1	3848.3	—229.4
33	0.64		65.01	3.81	3988.3	—234.0	0	0	3988.3	—234.0
34	0.66		67.30	3.79	4128.8	—232.5	+4.4	—11.1	4133.2	—242.6
35	0.68		69.65	3.86	4273.0	—237.5	+7.1	—16.4	4280.1	—253.9
36	0.70		72.06	4.08	4420.8	—251.5	+7.1	—16.4	4427.9	—267.9

NOTA. — L'oiseau a commencé par remonter légèrement au-dessus de la position correspondant à la première image : les longueurs affectées du signe + doivent être portées vers le haut, les autres vers le bas.

DEUXIÈME PLAQUE

Vol oblique en descendant.

Longueur de l'image d'une règle de deux mètres........................ 32^{mm},60
Réduction des dimensions réelles par la photographie................. 61^{mm},35

NUMÉROS des IMAGES.	TEMPS en SECONDES	PHASES DU COUP D'AILE	DÉPLACEMENTS DU POINT DE REPÈRE		DÉPLACEMENTS RÉELS DU CORPS DE L'OISEAU		CORRECTION DUE AU MOUVEMENT du centre de gravité.		DÉPLACEMENTS RÉELS DU CENTRE DE GRAVITÉ	
			Horiz.	Vertic.	Horiz.	Vertic.	Horiz.	Vertic.	Horiz.	Vertic.
			mm.	mm.	mm.	mm.	mm.	mm.	mm.	mm.
1	0	Élévation. — Fin du 1er coup d'aile.	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0.02		1.60	0.26	98.2	— 15.95	—4.4	+10.1	93.8	— 5.8
3	0.04		3.07	0.53	188.3	— 32.50	—7.1	+16.4	181.2	— 16.1
4	0.06	2e coup d'aile. Abaissement.	4.53	0.67	277.5	— 41.10	—7.1	+16.4	270.4	— 24.7
5	0.08		6.15	0.77	377.3	— 47.24	—4.4	+10.1	372.9	— 37.1
6	0.10		7.80	0.81	478.5	— 49.7	0	0	478.5	— 49.7
7	0.12		9.40	0.94	577.0	— 57.67	+4.4	—10.1	581.4	— 67.6
8	0.14		11.25	1.32	679.0	— 80.1	+7.1	—16.4	686.1	— 96.5
9	0.16	Élévation.	13.13	1.53	805.5	— 93.86	+7.1	—16.4	812.6	—110.3
10	0.18		15.01	1.74	921.0	—106.75	+4.4	—10.1	925.4	—116.8
11	0.20		16.69	2.36	1024.0	—144.80	0	0	1024.0	—144 8
12	0.22		18.52	2.82	1136.0	—173.00	—4.4	+10.1	1131.6	—152.9
13	0.24		20.15	3.14	1236.0	—192.64	—7.1	+16.4	1228.9	—176.2
14	0.26	3e coup d'aile. Abaissement.	21.79	3.46	1337.0	—212.27	—7.3	+16.7	1329.7	—195.6
15	0 28		23.44	3.63	1438.0	—222.7	—5.3	+12.4	1432.7	—210.3
16	0.30		25.22	3.76	1547.0	—230.7	—1.9	+ 4.5	1545.1	—226.2
17	0.32		27.00	3.97	1657.0	—242.9	+1.9	— 4.5	1658.9	—247.4
18	0.34		28.90	4.41	1773.0	—270.5	+5.3	—12.4	1778.3	—282.9
19	0.36		30.95	4.80	1899.0	—294.5	+7.3	—16.7	1906.3	—301.2
20	0.38	Élévation.	33.00	5.25	2024.6	—322.1	+7.3	—16.7	2031.9	—338.8
21	0.40		35.04	5.69	2150.0	—349.1	+5.3	—12.4	2155.3	—361.5
22	0.42		36.92	6.18	2265.0	—379.0	+1.9	— 4.5	2266.9	—283.5
23	0.44		38.82	6.63	2382.0	—406.7	—1.9	+ 4.5	2380.1	—402.2
24	0.46		40.65	6.78	2494.0	—415.9	—5.3	+12.4	2488.7	—403.5
25	0.48		42.47	6.93	2605.5	—425.1	—7.3	+16.7	2598.3	—408.4
26	0.50	4e coup d'aile. Abaissement.	44.29	7.09	2717.0	—435.0	—7.1	+16 4	2709.9	—418.6
27	0.52		46.25	7.14	2837.0	—438.0	—3.7	+ 8.7	2833.3	—429.3
28	0.54		48.26	7.40	2960.6	—454.0	+1.3	— 3.0	2961.9	—457.0
29	0.56		50.34	7.61	3088.5	—467.0	+5.7	—13.2	3094.2	—480.2
30	0.58		52.44	7.84	3217.3	—481.0	+7.5	—17.5	3224.8	—498.5
31	0.60	Élévation.	54.59	8 08	3349.0	—496.0	+5.7	—13.2	3354.7	—509.2
32	0.62		56.79	8.70	3484.0	—509.5	+1.3	— 3.0	3485.3	—512.5
33	0.64		59.00	9.12	3620 0	—557.0	—3.7	+ 8.7	3616.3	—548.3
34	0.66		60.98	9.45	3741.0	—580.0	—7.1	+16.4	3733.9	—563.6
35	0.68	Abaissement. — Commencement du 5e coup d'aile.	62.85	9.63	3856.0	—591.0	—7.3	+16.7	3848.7	—574.3
36	0.70		64.80	9.73	3975.0	—597.0	—5.3	+12.4	3969.7	—584.6
37	0.72		66.79	9.86	4097.8	—605.0	—1.9	+ 4.5	4095.9	—600.5
38	0.74		68.90	10.11	4227.0	—620.0	+1.9	— 4.5	4228.9	—624.5
39	0.76		71.13	10.45	4363.0	—641.0	+5.3	—12.4	4368.3	—653.4
40	0.78		73.44	10.98	4505.5	—674.0	+7.3	—16.7	4512.8	—690.7

10. — Valeurs numériques des vitesses et des forces.

A l'aide des déplacements du centre de gravité inscrits dans les tableaux précédents, on a calculé les vitesses successives acquises par l'oiseau et les composantes horizontales et verticales de la force à laquelle il s'est trouvé soumis, par les moyens indiqués au début (§ 4). Les incertitudes et les écarts à craindre dans les mesures ayant pu amener quelques irrégularités dans la mesure des vitesses, on a inscrit à côté des valeurs de celles-ci, déduites du calcul, les valeurs relevées sur les courbes continues C et D, tracées en suivant le mieux possible l'ensemble des points successifs représentant les résultats du calcul (voir planches I et II).

On peut se rendre compte que les changements ainsi introduits n'ont que peu d'importance par rapport aux valeurs des vitesses mesurées, tout en ayant permis d'observer une plus grande continuité et d'écarter les variations brusques et exagérées présentées en certains points par la courbe des vitesses.

Les tableaux ci-après renferment les résultats des calculs.

PREMIÈRE PLAQUE

Vol sensiblement horizontal (36 images).

PHASE du COUP D'AILE.	TEMPS en centièm. de seconde	DÉPLACEMENTS TOTAUX		ESPACES SUCCESSIFS		VITESSES DÉDUITES DU CALCUL		VITESSES DÉDUITES DES COURBES		DIFFÉRENCES DES VITESSES		FORCES	
	sec/100	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.
		mm.	mm.	mm.	mm.	mèt.	mèt.	mèt.	mèt.	mèt.	mèt.	kilos.	kilos.
1er coup d'aile. Abaissement.	0.00	— 7.1	+16.4										
	0.01			103.9	— 3.2	5.195	—0.160	5.195	—0.190				
	0.02	+96.8	+13.2							+0.425	—0.050	+1.347	—0.158
	0.03			114.2	— 4.6	5.710	—0.230	5.620	—0.240				
	0.04	211.4	+ 8.6							+0.480	+0.165	+1.520	+0.523
	0.05			119.4	— 1.5	5.970	—0.075	6.100	—0.075				
	0.06	330.4	+ 7.1							+0.235	—1.010	+0.790	—3.200
	0.07			126.7	—21.7	6.335	—1.085	6.335	—1.085				
Relèvement.	0.08	457.1	—14.6							—0.385	+0.380	—1.220	+1.220
	0.09			117.0	—14.1	5.850	—0.705	5.950	—0.705				
	0.10	574.1	—28.7							—0.070	+0.060	—0.222	+0.190
	0.11			118.6	—12.9	5.930	—0.645	5.880	—0.645				
	0.12	692.7	—41.6							—0.110	+0.125	—0.349	+0.387
	0.13			117.3	—10.4	5.865	—0.520	5.770	—0.520				
	0.14	810.0	—52.0							—0.500	+0.250	—1.582	+0.782
	0.15			103.2	— 5.4	5.160	—0.270	5.270	—0.270				
	0.16	913.2	—57.4							—0.150	—0.300	—0.475	—0.950
	0.17			119.6	—10.9	5.980	—0.545	5.120	—0.570				

PREMIÈRE PLAQUE (*suite*).

PHASE du COUP D'AILE.	TEMPS en centièm. de seconde	DÉPLACEMENTS TOTAUX		ESPACES SUCCESSIFS		VITESSES DÉDUITES DU CALCUL		VITESSES DÉDUITES DES COURBES		DIFFÉRENCES DES VITESSES		FORCES	
	sec/100	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.
		mm.	mm.	mm.	mm.	mèt.	mèt.	mèt.	mèt.	mèt.	mèt.	kilos.	kilos.
2e coup d'aile. Abaissement.	0.18	1033	— 68.3							+0.150	—0.030	+0.475	—0.095
	0.19			103	—11.8	5.15	—0.590	5.270	—0.600				
	0.20	1136	— 80.1							+0.810	+0.095	+2.570	+0.327
	0.21			119	—10.1	5.95	—0.505	6.080	—0.505				
	0.22	1245	— 90.2							+0.620	+0.370	+1.960	+1.175
	0.23			134	— 2.7	6.70	—0.135	6.700	—0.135				
	0.24	1379	— 92.9							—0.340	—0.150	—1.108	—0.475
	0.25			124	— 5.7	6.20	—0.285	6.360	—0.285				
	0.26	1503	— 98.6							—0.030	—0.450	—0.095	—1.415
	0.27			127	—14.7	6 35	—0.735	6.390	—0.735				
Élévation.	0.28	1630	—113.3							+0.040	+0.150	+0.127	+0.475
	0.29			130	— 6.5	6.50	—0.325	6.430	—0.585				
	0.30	1760	—119.8							+0.040	+0.345	+0.127	+1.090
	0.31			129	—10.4	6.45	—0.520	6.470	—0.240				
	0.32	1889	—120.2							+0.005	+0.230	+0.002	+0.760
	0.33			129	— 0.2	6.45	—0.010	6.475	—0.010				
	0.34	2018	—120.4							—0.075	—0.230	—0.237	—0.760
	0.35			128	— 5.9	6.40	—0.295	6.400	—0.240				
	0.36	2146	—116.3							—0.360	—0.460	—1.140	—1.460
3e coup d'aile. Abaissement.	0.37			122	—10.8	6.10	—0.540	6.040	—0.700				
	0.38	2268	—137.1							—0.340	—0.460	—1.080	—1.460
	0.39			114	—21.2	5.70	—1.060	5.700	—1.060				
	0.40	2382	—158.3							+0.180	+0.660	+0.570	+2.080
	0.41			126	— 8.0	6.80	—0.400	5.880	—0.400				
	0.42	2508	—166 3							+0.350	+0.280	+1.108	+0.877
	0.43			129	— 2.4	6.45	—0.120	6.230	—0.120				
	0.44	2637	—168.7							+0.560	—0.155	+1.778	0.482
	0.45			133	— 5.5	6.65	—0.275	6.790	—0.275				
	0.46	2770	—174.2							+0.410	—0.300	+1.300	0.950
	0.47			137	—11.5	6.85	—0.575	7.200	—0.575				
	0.48	2907	—185.7							+0.200	+0.225	+0.635	+0.728
	0.49			148	— 7.0	7.40	—0.350	7.400	—0.350				
Élévation.	0.50	3055	—192.7							—0.550	—0.025	—1.740	—0.078
	0.51			137	— 7.5	6.85	—0.375	6.850	—0.375				
	0.52	3192	—200.2							+0.050	+0.105	+ 0.158	+0.332
	0.53			138	— 5.4	6.90	—0.270	6.900	—0.270				
	0.54	3330	—205.6							—0.100	+0.110	—0.316	+0.348
	0.55			136	— 1.2	6.80	—0.060	6.800	—0 060				
	0.56	3466	—206.8							—0.450	—0.140	—1.425	—0.443
	0.57			127	— 4.0	6.35	—0.200	6.350	—0.200				
	0.58	3593	—210.8							—0.030	—0.440	—0.095	—1.395
	0.59			127	—12.8	6.35	—0.640	6.320	—0.640				
	0.60	3720	—223.6							—0.100	+0.350	—0.316	+1.110
4e coup d'aile. Abaissement.	0.61			128	— 5.8	6.40	—0.290	6.420	—0.290				
	0.62	3848	—229.4							+0.410	+0.060	+1.300	+0.190
	0.63			140	— 4.6	7.0	—0.230	6.830	—0.230				
	0.64	3988	—234.0							+0.420	—0.030	+1.330	—0.95
	0.65			144	— 8.6	7.2	—0.430	7.250	—0.360				
	0.66	4132	—242.6							+0.150	—0.220	+0.475	—0.695
	0.67			148	—10.3	7.40	—0.515	7.400	—0.530				
	0.68	4280	—253.9							0.00	—0.120	0.00	—0 380
	0.69			148	—14.0	7.40	—0.700	7.400	—0.700				
	0.70	4428	—267.9										

DEUXIÈME PLAQUE

Vol oblique en descendant (40 IMAGES).

PHASE du COUP D'AILE.	TEMPS en centièm. de seconde $\frac{sec}{100}$	DÉPLACEMENTS TOTAUX		ESPACES SUCCESSIFS		VITESSES DÉDUITES DU CALCUL		VITESSES DÉDUITES DES COURBES		DIFFÉRENCES DES VITESSES		FORCE	
		Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.
		mm.	mm.	mm.	mm.	mèt.	mèt.	mèt.	mèt.	mèt.	mèt.	kilos.	kilos.
1er coup d'aile (*fin*). Élévation.	0.00	0	0										
	0.01			93.8	— 5.8	4.690	—0.290	4.690	—0.290				
	0.02	93.8	— 5.8							—0.320	—0.225	—1.010	—0.713
	0.03			87.4	—10.3	4.37	—0.515	4.370	—0.515				
	0.04	181.2	—16.1							+0.070	+0.085	+0.222	+0.268
2e coup d'aile. Abaissement.	0.05			89.2	— 8.6	4.56	—0.430	4.440	—0.430				
	0.06	270.4	—24.7							+0.685	+0.290	+2.170	+0.920
	0.07			102.5	— 2.4	5.125	—0.120	5.125	—0.140				
	0.08	372.9	—37.1							+0.155	—0.360	+0.490	—1.140
	0.09			105.6	—12.6	5.28	—0.630	5.280	—0.500				
	0.10	478.5	—49.7							—0.135	—0.600	—0.428	—1.900
	0.11			102.9	—17.9	5.145	—0.895	5.145	—1.100				
	0.12	581.4	—67.6							+0.090	—0.345	+0.285	—1.090
	0.13			104.7	—28.9	5.235	—1.445	5.235	—1.445				
	0.14	686.1	—96.5							+1.090	+0.755	+3.450	+2.380
Élévation.	0.15			126.5	—13.8	6.325	—0.690	6.325	—0.690				
	0.16	812.6	—110.3							—0.685	+0.390	—2.170	+1.235
	0.17			112.8	—16.5	5.640	—0.325	5.640	—0.300				
	0.18	925.4	—116.8							—0.600	+0.160	—1.900	+0.510
	0.19			98.6	—28.0	4.930	—0.140	5.040	—0.140				
	0.20	1024	—144.8							—0.140	—0.260	—0.444	—0.825
	0.21			108	— 8.1	5.40	—0.405	4.900	—0.400				
	0.22	1132	—152.9							0.0	—0.765	0.0	—2.425
	0.23			97	—23.3	4.85	—0.165	4.900	—1.165				
	0.24	1229	—176.2							+0.150	+0.155	+0.475	+0.477
3e coup d'aile. Abaissement.	0.25			101	—19.4	5.05	—0.970	5.050	—1.010				
	0.26	1330	—195.6							+0.100	+0.330	+0.316	+1.044
	0.27			103	—14.7	5.15	—0.735	5.150	—0.680				
	0.28	1433	—210.3							+0.450	+0.385	+1.425	+1.219
	0.29			112	— 5.9	5.60	—0.295	5.600	—0.295				
	0.30	1545	—226.2							+0.100	+0.765	+0.316	+2.425
	0.31			114	—21.2	5.70	—1.060	5.700	—1.060				
	0.32	1659	—247.4							+0.250	—0.710	+0.790	—2.245
	0.33			119	—35.5	5.95	—1.775	5.950	—1.775				
	0.34	1778	—282.9							+0.450	+0.360	+1.425	+1.140
Élévation.	0.35			128	—28.3	6.40	—1.415	6.400	—1.415				
	0.36	1906	—311.2							—0.060	+0.085	—0.190	+0.268
	0.37			126	—26.6	6.30	—1.330	6.340	—1.330				
	0.38	2032	—338.8							—0.340	+0.150	—1.077	+0.475
	0.39			123	—22.7	6.15	—1.135	6 000	—1.180				
	0.40	2155	—361.5							—0.400	+0.140	—1.270	+0.443
	0.41			112	—22.0	5.6	—1.100	5.600	—1.040				
	0.42	2267	—383.5							—0.010	+0.320	—0.032	+1.012
	0.43			113	—18.7	5.65	—0.935	5.590	—0.720				
	0.44	2380	—402.2							—0.060	+0.655	—1.190	+2.070
	0.45			109	— 1.3	5.45	—0.065	5.530	—0.065				
	0.46	2489	—403.5							—0.180	—0.180	—0.252	—0.570
	0.47			109	— 4.9	5.45	—0.245	5.450	—0.245				
	0.48	2598	—408.4							+0.100	—0.265	+0.316	—0 840

DEUXIÈME PLAQUE (*suite*).

PHASE du COUP D'AILE.	TEMPS en centièm. de seconde	DÉPLACEMENTS TOTAUX		ESPACES SUCCESSIFS		VITESSES DÉDUITES DU CALCUL		VITESSES DÉDUITES DES COURBES		DIFFÉRENCES DES VITESSES		FORCES	
	sec/100	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.
		mm.	mm.	mm.	mm.	mèt.	mèt.	mèt.	mèt.	mèt.	mèt.	kilos.	kilos.
4e coup d'aile. Abaissement.	0.49			112	—10.2	5.60	—0.510	5.550	—0.510				
	0.50	2710	—418.6							—0.400	—0.090	—1.265	—0.285
	0.51			123	—10.7	6.15	—0.535	5.150	—0.600				
	0.52	2833	—429.3							+1.300	—0.785	+4.100	—2.472
	0.53			129	—27.7	6.45	—1.385	6.45	—1.385				
	0.54	2962	—457.0							+0.150	+0.185	+0.475	+0.585
	0.55			132	—23.2	6.60	—1.160	6.60	—1.200				
	0.56	3094	—480 2							—0.050	+0.335	—0.158	+1.060
	0.57			131	—17.3	6.55	—0.865	6.55	—0.865				
	0.58	3225	—498.5							—0.090	+0.445	—0.285	+1.410
Élévation.	0.59			130	—10.7	6.50	—0.535	6.460	—0.420				
	0.60	3355	—509.2							+0.040	+0.255	+0.126	+0.809
	0.61			130	— 3.3	6.50	—0.165	6.50	—0.165				
	0.62	3485	—512.5							+0.050	—1.125	+0.158	—3.560
	0.63			131	—25.8	6.55	—1.290	6.55	—1.290				
	0.64	3616	—548.3							—0.650	+0.490	—2.060	+1.550
	0.65			118	—15.3	5.90	—0.765	5.90	—0.800				
	0.66	3734	—563.6							—0.150	+0.265	—0.475	+0.840
	0.67			115	—10.7	5.75	—0.535	5.750	—0.535				
5e coup d'aile. — Abaissement.	0.68	3849	—574.3							+0.300	+0.020	+0.950	+0.067
	0.69			121	—10.3	6.05	—0.515	6.050	—0.515				
	0.70	3970	—584.6							—0.250	—0.280	—0.710	—0.887
	0.71			126	—15.9	6.30	—0.795	6.300	—0.795				
	0.72	4096	—600.5							+0.350	—0.405	+1.110	—1.280
	0.73			133	—24.0	6.65	—1.200	6.65	—1.200				
	0.74	4229	—624.5							+0.400	—0.245	+4.447	—0.775
	0.75			141	—28.9	7.05	—1.445	7.05	—1.445				
	0.76	4368	—653.4							+0.200	—0.420	+0.664	—1.330
	0.77			145	—37.3	7.95	—1.865	7.25	—1.865				
	0.78	4513	—699.7										

PLANCHE I

Vol sensiblement horizontal.

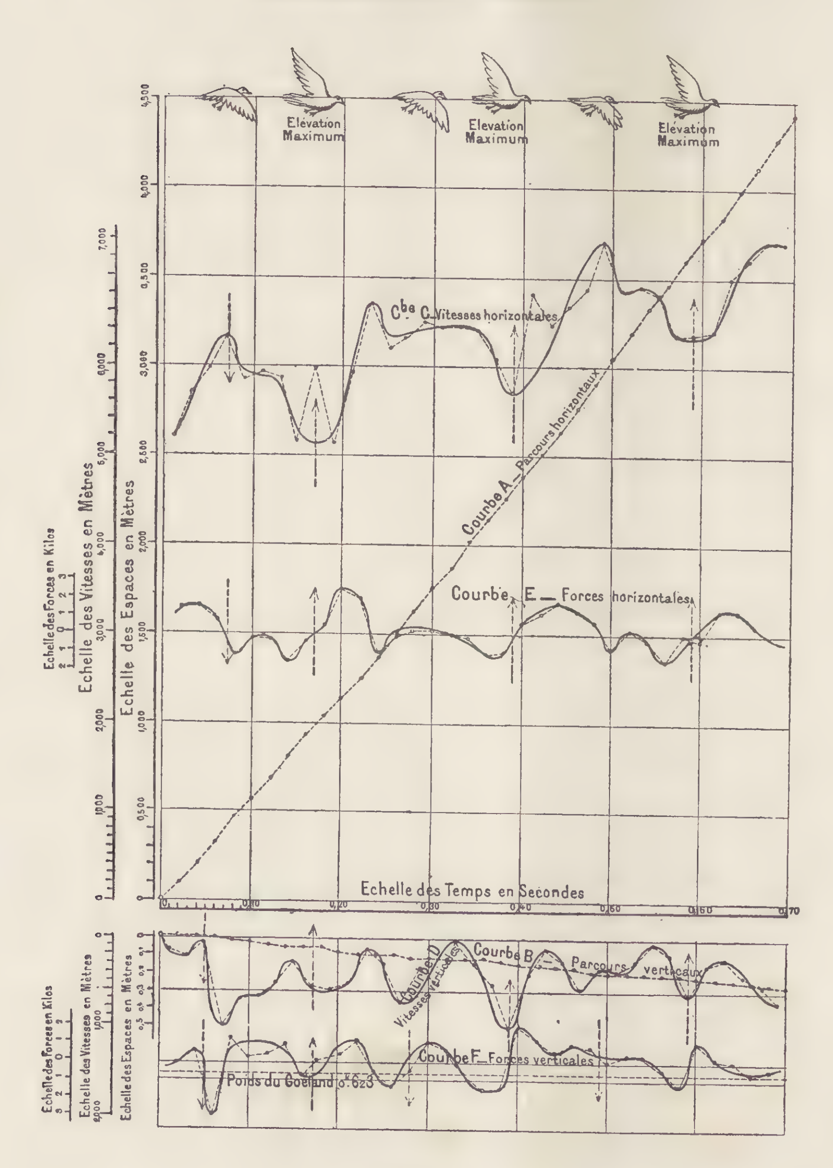
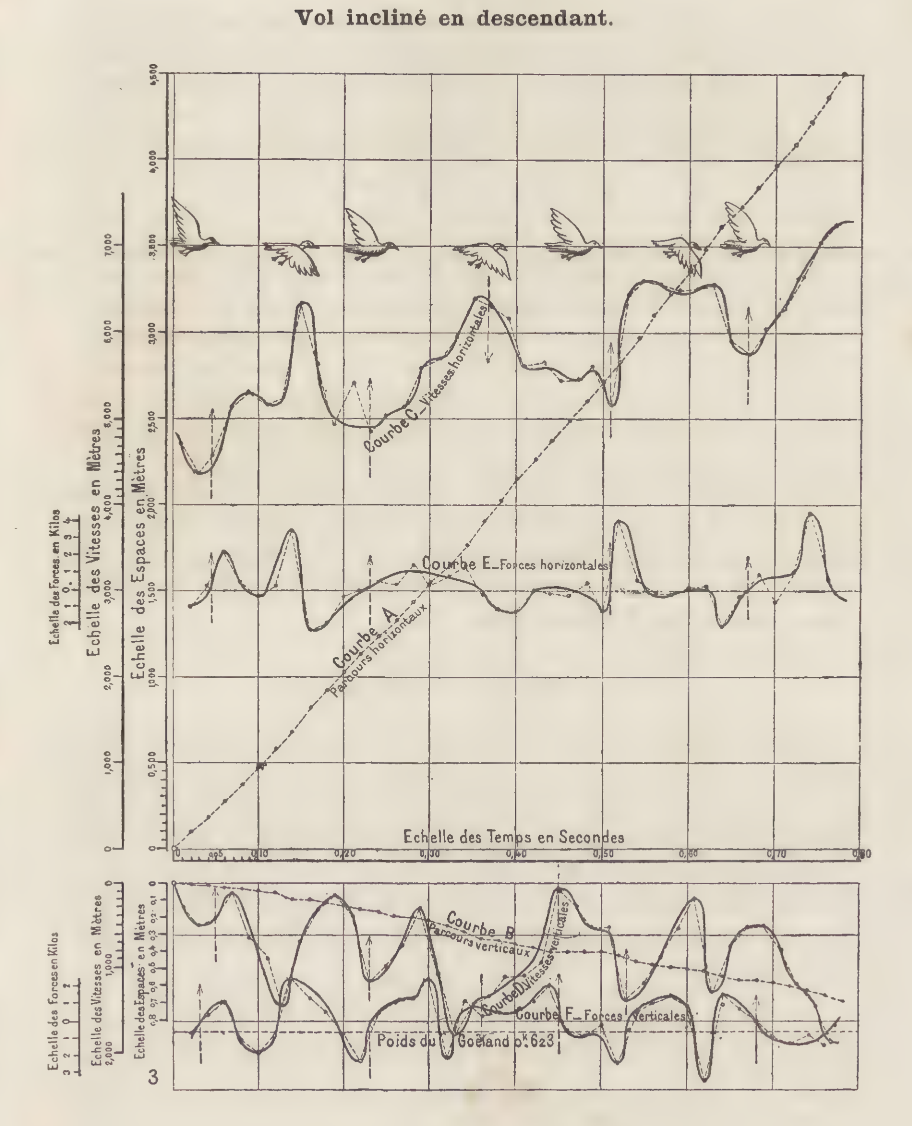


Planche II

Vol incliné en descendant.



11. — Examen des résultats numériques obtenus.

On peut voir, à l'inspection des courbes, combien la régularisation des vitesses a été facile ; les courbes continues suivent presque fidèlement la ligne brisée formée par la succession des points fournis par le calcul.

Les courbes des vitesses horizontales (courbes C) présentent pour la première plaque à la fin du 1[er] coup d'aile et à la fin du 2[e], et pour la deuxième plaque à la fin du 2[e] coup d'aile, un écart assez notable avec les résultats du calcul ; ce fait provient sans aucun doute de l'incertitude sur le moment précis où finit le coup d'aile. Il suffirait, pour ces trois cas, de supposer que l'élévation complète des ailes a eu lieu un cinquantième de seconde plus tard, pour modifier les résultats du calcul, de manière à les mettre d'accord avec les courbes continues. En effet, en faisant cette modification, on serait conduit à retarder le moment où on ajoute aux espaces mesurés sur le point de repère l'avance maximum du centre de gravité des ailes, c'est-à-dire qu'on diminuerait un peu les vitesses de l'oiseau correspondant aux mouvements précédemment choisis comme marquant la fin des coups d'aile, pour les augmenter dans l'intervalle suivant. L'examen des courbes montre que c'est bien le sens de la correction à effectuer pour avoir des vitesses horizontales variant régulièrement aux trois points défectueux qui viennent d'être signalés.

12. — Vitesses horizontales.

Les courbes des vitesses horizontales présentent du reste une régularité bien remarquable. Les photographies obtenues embrassent toutes deux à peu près trois coups d'aile complets. Leur direction générale montre que la vitesse moyenne de l'oiseau s'accroît de quantités sensiblement égales à chaque battement. Cette régularité est une présomption en faveur de la méthode employée pour déterminer la correction due au mouvement du centre de gravité de la masse générale de l'oiseau.

Les successions des vitesses horizontales présentent dans chaque coup d'aile la même loi : à une brusque augmentation de vitesse succède une période de décroissance moins rapide ; la valeur de la vitesse reste un moment stationnaire, se relève un peu quelquefois, puis diminue, jusqu'au coup d'aile suivant.

Cette succession des vitesses est bien d'accord avec les mouvements de l'aile constatés par l'observation et analysés par M. Marey.

Au moment où l'aile est élevée le plus possible, les muscles qui servent à l'abaisser sont à leur maximum de tension ; le premier mouvement de l'aile doit donc être assez rapide : à ce moment elle est presque verticale ; sa partie antérieure, en s'abaissant par une rotation autour d'un axe presque parallèle à la direction du vol, détermine un appui sur l'air en même temps que la position inclinée que les rémiges prennent par suite de la résistance même de l'air détermine un mouvement de propulsion, dû à la composante horizontale de la résistance de l'air ; l'aile se trouvant alors former, au moins en partie, un plan oblique à la direction du vol, et la résistance de l'air étant perpendiculaire à ce plan, concourt aux deux effets de propulsion en avant et de soutien vertical. Vers le moment où l'aile est complètement abaissée, la vitesse horizontale atteint un maximum, et reste ensuite sensiblement constante ; la seule force horizontale qui agisse pendant ce temps sur l'oiseau est la résistance de l'air, qui est très faible, puisqu'elle n'agit que sur un corps de forme allongée animé d'une faible vitesse, savoir, la partie indéformable du corps de l'oiseau, et sur les ailes, qui présentent à cet instant leur tranche antérieure dans le sens du mouvement.

On sait (*Mécanique industrielle* de Poncelet) que la résistance opposée par l'air au mouvement d'un prisme dont la longueur est trois fois le côté antérieur est égale à

$$Q = 0{,}0625 \times 1{,}10 \times AV^2,$$

où A est la surface antérieure du corps en mètres carrés, et V la vitesse en mètres. Admettant, comme première approximation, que l'oiseau expérimenté présente dans le sens horizontal une surface de 1 décimètre carré pour la partie invariable, et que sa longueur soit trois fois son plus grand diamètre, on voit que l'on obtient pour première valeur de la résistance de l'air dans le vol observé, où la vitesse moyenne était d'environ 6,00 pour la première épreuve et 6,50 pour la seconde,

$$Q' = 0^k{,}025$$
$$Q'' = 0^k{,}029.$$

La résistance de l'air sur la partie indéformable du corps de l'oiseau, dont les formes allongées à l'avant et à l'arrière facilitent le mouvement, sont plus faibles encore, et lorsque les ailes présentent leur tranche, elles offrent une résistance insignifiante. On peut admettre que cette résistance est au plus de 20 grammes.

Pendant que l'aile se relève, la résistance de l'air continue d'agir, et la vitesse devrait diminuer jusqu'à l'abaissement suivant; elle paraît cependant croître un peu vers la fin du coup d'aile.

Ce fait s'explique si l'on considère que les ailes se portent en arrière pendant le relèvement, et que ce mouvement se produit avec une vitesse un peu moindre que celle prise par les ailes dans le mouvement d'abaissement; l'aile s'abaisse en effet un peu plus vite qu'elle ne remonte, ainsi que l'a constaté M. Marey.

Bien que, pendant le mouvement de relèvement, les plumes de l'oiseau tournent sur elles-mêmes pour présenter leurs tranches à l'air, les deux ailes n'en constituent pas moins deux corps animés d'un mouvement d'avant en arrière par rapport au corps de l'oiseau, et il peut se faire que l'air presse un peu sur la surface arrière de l'aile.

Il est à présumer que cet accident ne se produirait pas dans le plein vol, une fois que l'oiseau aurait pris toute sa vitesse, celle-ci étant devenue suffisante pour que l'aile, même dans le mouvement de relèvement, fuie en avant par rapport aux molécules d'air situées au-dessus d'elle.

13. — Vitesses verticales.

Les vitesses verticales présentent aussi une grande régularité. Toujours dirigées vers le bas dans les deux expériences étudiées, elles présentent un maximum de valeur absolue à la fin de chaque coup d'aile, comme on pouvait s'y attendre; en effet, à ce moment, l'aile vient de changer le sens de son mouvement et n'a pu encore frapper l'air; il en résulte que pendant un petit intervalle de temps l'oiseau reste soumis aux forces résistantes, pesanteur et résistance de l'air. Sa vitesse de descente doit donc devenir maximum.

Mais un phénomène singulier au premier abord, c'est la présence, dans la deuxième période du coup d'aile, d'une diminution de la vitesse de descente. Ce phénomène s'explique assez facilement.

Au début du coup d'aile l'oiseau frappe l'air, l'aile étendue et sensiblement plane; il développe une grande force. Si l'on songe que l'oiseau étudié avait des ailes de 6 décimètres carrés 1/2 chacune, que la vitesse du centre de pression de l'aile doit approcher en moyenne de celle d'un point se mouvant sur un cercle de rayon égal au tiers de l'envergure, $0^{m},35$, de manière à parcourir ce cercle en $\frac{1}{5}$ de seconde, durée du coup d'aile moyen, on peut assimiler le déplacement de

l'aile au début de chaque coup à celui d'un plan de 6 décimètres carrés 1/2 de surface, animé d'une vitesse moyenne de

$$2\pi\,0{,}35 \times 5 \quad \text{ou} \quad 11 \text{ mètres,}$$

et comme il y a des moments où le mouvement de ce plan change de sens et où sa vitesse devient nulle, il n'est pas trop aventureux d'admettre que la vitesse du centre de pression de l'aile peut atteindre 16 à 17 mètres. Dans ces conditions, la résistance de l'air sur les deux ailes peut s'élever à

$$Q = (0{,}0625 \times 1{,}43 \times 0{,}065 \times 17^2) \times 2$$

ou $3^k{,}400$ environ (Poncelet, *Mécanique industrielle*). En admettant l'aile inclinée à 45° sur la direction du vol, la composante horizontale oscillerait de 0 à $2^k{,}400$ environ. Il suffit de jeter un coup d'œil sur les tableaux et sur les courbes des forces, pour voir que les valeurs maxima des forces réellement développées par l'oiseau, soit dans le sens horizontal, soit dans le sens vertical, ne s'éloignent pas sensiblement des limites :

$2^k{,}400$ pour le déplacement horizontal;
$3^k{,}400$ pour le déplacement vertical.

On doit donc, au début du coup d'aile, rencontrer chez l'oiseau une force opposée à la pesanteur et notablement plus grande que le poids de l'oiseau. Mais sous l'influence de la résistance de l'air les ailes s'inclinent, la partie arrière en haut, la composante horizontale de la résistance de l'air prédomine, la composante verticale s'annule presque; la vitesse de descente commence à croître après avoir passé par un minimum. A la fin de l'abaissement, la composante horizontale disparaît à son tour, et l'oiseau n'est plus entraîné horizontalement, qu'en vertu de la vitesse acquise.

L'inspection des images photographiques montre que vers la fin du coup d'aile, celle-ci offre la forme d'une cloche dont l'ouverture est dirigée en avant; la résistance de l'air due au mouvement horizontal de propulsion provenant de la vitesse acquise précédemment agit sur cette cloche pour soulever l'oiseau, et on comprend comment, même pendant la remontée des ailes, la vitesse de descente du centre de gravité de la masse de l'oiseau peut encore diminuer.

14. — Des erreurs de mesure qui peuvent être causées par une erreur sur les déplacements du centre de gravité à l'intérieur du corps de l'oiseau.

Il convient d'examiner quelle influence peuvent avoir sur les résultats des calculs les corrections faites pour tenir compte des mouvements horizontaux et verticaux du centre de gravité de la masse totale de l'oiseau.

On a vu que x_1 et y_1 étant les coordonnées du centre de gravité de la partie indéformable, et α et β les coordonnées du centre de gravité de la masse totale par rapport à deux axes mobiles entraînés avec la partie indéformable, on avait pour coordonnées du centre de gravité général par rapport aux axes fixes,

$$x = x_1 + \alpha,$$
$$y = y_1 + \beta,$$

α et β étant donnés par

$$\alpha = -0.0075 \cos 2\pi \frac{\theta}{T},$$

$$\beta = +0,0175 \cos 2\pi \frac{\theta}{T},$$

T étant la durée du coup d'aile étudié, θ le temps écoulé depuis le commencement de ce coup d'aile.

On en déduit

$$V_x = \frac{\Delta . x}{\Delta . t} = \frac{\Delta . x_1}{\Delta . t} + 0,0075 \times \frac{2\pi}{T} \sin 2\pi \frac{\theta}{T}$$
$$V_y = \frac{\Delta . x}{\Delta . t} = \frac{\Delta . y_1}{\Delta . t} - 0,0175 \times \frac{2\pi}{T} \sin 2\pi \frac{\theta}{T},$$

ou, en tenant compte de la valeur moyenne du coup d'aile,

$$T = \frac{1^{sec}}{5},$$

$$V_x = \frac{\Delta . x_1}{\Delta . t} + 0,22 \sin \frac{2\pi\theta}{T},$$
$$V_y = \frac{\Delta . y_1}{\Delta . t} - 0,55 \sin \frac{2\pi\theta}{T}.$$

On voit qu'en admettant même que les erreurs inévitables dans la recherche des positions du centre de gravité par la planche de Borelli aient dû fausser les valeurs prises pour les déplacements du centre de gravité jusqu'à doubler leur valeur, la correction relative au mouvement du centre de gravité général de l'oiseau ne peut introduire sur la mesure des vitesses d'erreur supérieure à $0^m,11$ pour les vitesses horizontales et $0^m,27$ pour les vitesses verticales.

Il en est de même, à plus juste titre, des erreurs que l'on peut commettre en assimilant le mouvement du centre de gravité à un mouvement vibratoire sur une droite inclinée située dans le corps de l'oiseau, comme cela a été supposé plus haut.

Pour les forces, on aura

$$F_x = \frac{P}{g}\frac{\Delta^2.x}{\Delta.t^2} = \frac{P}{g}\frac{\Delta^2.x_1}{\Delta.t^2} - \frac{P}{g}\,0{,}0075\,\frac{4\pi^2}{T^2}\cos\frac{2\pi\theta}{T}$$
$$F_y = \frac{P}{g}\frac{\Delta^2,y}{\Delta.t^2} = \frac{P}{g}\frac{\Delta^2.y_1}{\Delta.t^2} + \frac{P}{g}\,0{,}0175\,\frac{4\pi^2}{T^2}\cos\frac{2\pi\theta}{T}$$

ou, tous calculs faits,

$$F_x = 0{,}064\,\frac{\Delta^2.x_1}{\Delta.t^2} - 0^k{,}470\cos\frac{2\pi\theta}{T}$$
$$F_y = 0{,}064\,\frac{\Delta^2.y_1}{\Delta.t^k} + 1^k{,}100\cos\frac{2\pi\theta}{T}.$$

En supposant qu'on ait commis sur les valeurs des déplacements du centre de gravité général à l'intérieur du corps de l'oiseau une erreur du simple au double, les corrections faites entraîneraient donc dans la mesure des forces horizontales une erreur au plus égale à

$$0^k.235\cos\frac{2\pi\theta}{T}$$

et pour les forces verticales, une erreur maximum de

$$0^k{,}550\cos\frac{2\pi\theta}{T}.$$

Il est à remarquer que ces erreurs sont les plus grandes possibles à la fin et au milieu de chaque coup d'aile, lorsque le cosinus de l'arc devient égal à l'unité. Elles deviennent nulles pour la fin du premier quart

et la fin du troisième quart du coup d'aile. Il n'y a donc de réelles réserves à faire qu'au sujet des forces correspondantes au commencement et à la moitié du coup d'aile. Les valeurs des forces calculées pour les autres instants seraient entachées d'erreur bien moindre.

Si l'observation conduit à une mesure exagérée des déplacements du centre de gravité, les forces calculées présenteront les erreurs suivantes :

Forces horizontales :

Erreur en moins dans le premier et le dernier quart du coup d'aile ;

Erreur en plus dans l'autre moitié.

Forces verticales :

Erreur en plus dans le premier et le dernier quart du coup d'aile ;

Erreur en moins dans l'autre moitié.

La discussion précédente montre qu'il y a un très grand intérêt à connaître exactement les déplacements du centre de gravité correspondants aux déformations des ailes, et qu'on commettrait probablement une très grosse erreur en les négligeant complètement et se contentant d'étudier le mouvement d'un point de la partie indéformable du corps.

D'après le sens des erreurs possibles à commettre pendant les diverses périodes du coup d'aile, on voit que ces erreurs prennent les mêmes valeurs et des signes contraires, tant pour les forces horizontales que pour les forces verticales, pour chacune des moitiés de chaque phase principale, abaissement ou relèvement des ailes. Les mouvements horizontaux ou verticaux ayant été, dans les expériences étudiées, sensiblement uniformes pendant la durée du phénomène enregistré, on peut en conclure qu'une erreur, même grossière, sur les déplacements du centre de gravité n'introduirait qu'une erreur très faible dans la mesure des travaux des forces.

15. — Mesure du travail de l'oiseau.

Dans les deux exemples étudiés, les déplacements horizontaux et verticaux de l'oiseau sont sensiblement uniformes. Si donc on construisait les courbes des forces horizontales et verticales correspondantes aux espaces parcourus en prenant pour abscisses les espaces et pour ordonnées les forces, on trouverait des courbes dont la forme serait sensiblement la même que celle des courbes E et F des forces en fonction des temps.

Si l'on veut estimer le travail de l'oiseau, on peut donc se contenter

de relever les aires des courbes E et F, en tenant compte de l'échelle convenable pour que les abscisses représentent des espaces.

a. *Travail de propulsion.* — Pour les déplacements horizontaux, les composantes qui agissent sur l'oiseau sont :

1° La résistance de l'air sur la partie antérieure de son corps, force constamment dirigée en sens contraire du mouvement, et dont la valeur est d'environ 30 grammes ;

2° L'action des ailes, qui est tantôt utile et dirigée dans le sens du mouvement, tantôt résistante et diminue la vitesse.

La force à laquelle est soumis horizontalement l'oiseau est égale à la différence entre l'action des ailes et la résistance de l'air sur la partie antérieure de son corps.

Les courbes tracées donnent seulement la mesure de cette différence. Ainsi, lorsque l'oiseau est en M et que les courbes donnent pour va-

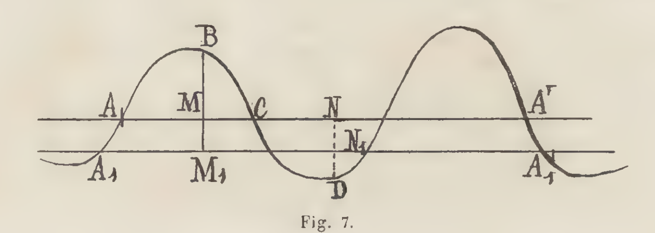


Fig. 7.

leur de la composante horizontale la valeur représentée par l'ordonnée MB, cela veut dire que la force horizontale développée par l'oiseau est égale à MB plus 30 grammes environ (fig. 7).

En menant au-dessous de l'axe du zéro des forces une droite à une distance représentant 30 grammes, les ordonnées comptées à partir de ce nouvel axe représenteront les forces effectivement dépensées par l'oiseau aux différents points de son parcours (fig. 8).

Un peu avant le point A, en A_1, il ne dépense aucune force utile, puis il développe une force croissante, d'abord plus faible que la résistance de l'air sur la partie antérieure de son corps, puis plus grande que cette résistance.

Le travail effectif dépensé par l'oiseau en passant de A_1 en C_1 est donc l'aire A_1ABCC_1. On voit donc que le travail utile total de l'oiseau sera donné en prenant la somme des aires positives de la courbe des forces, formées par les portions situées au-dessus de l'axe auxiliaire, tracé à une distance équivalente à 30 grammes de l'axe des O des forces.

A l'échelle à laquelle avaient été établies les courbes, dont les planches

ci-après ne donnent qu'une réduction, la distance MM correspondant à 30 grammes était représentée par 3 dixièmes de millimètre. Pour ne

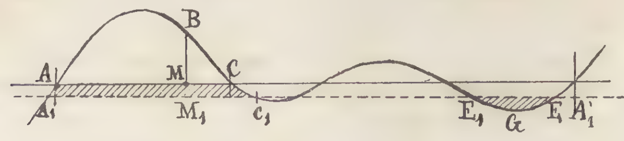


Fig. 8.

pas négliger le travail dû à la résistance de l'air, il suffisait donc d'ajouter aux aires telles que ABC mesurées sur la figure le produit par 30 grammes du parcours tels que AC, qui servent de bases à ces aires.

En opérant ainsi on trouve les résultats suivants.

TEMPS	PARCOURS		VITESSES	DEMI-FORCES VIVES GAGNÉES		AIRES DE LA COURBE des forces		TRAVAIL dû à la résistance de l'air.	TRAVAIL de L'OISEAU
	TOTAUX	SUCCESSIFS		+	−	+	−		
sec.	mm.	mm.	mètres/sec.	km.	km.	km.	km.	km.	km.
				Première plaque.					
0.07	400		6.300						
		600			0.430		0.465		0.450*
0.17	1.000		5.100						
		300		0.601		0.695		0.009	0.659
0.23	1.300		6.700						
		150			0.170		0.102		0.135*
0.25	1.450		6.300						
		420		0.063		0.065		0.013	0.077
0.32	1.870		6.440						
		730			0.285		0.288		0.287*
0.39	2.600		5.700						
		380		0.700		0.847		0.011	0.785
0.49	2.980		7.400						
		140			0.267		0.184		0.226*
0.51	3.120		6.800						
		130		0.047		0.014		0.005	0.035
0.53	3.250		6.900						
		400			0.260		0.291		0.275*
0.59	3.650		6.300						
		550		0.480		0.528		0.016	0.520
0.69	4.200		7.400						
				Deuxième plaque.					
0.04	200		4.400						
		225		0.255		0.347		0.007	0.308
0.09	425		5.250						
		100			0.035		0.056		0.045*
0.11	525		5.150						
		225		0.420		0.583		0.007	0.489
0.15	750		6.300						
		390			0.500		0.455		0.477*
0.22	1.140		4.900						
		760		0.543		0.611		0.023	0.600
0.36	1.900		6.400						
		900			0.478		0.647		0.562
0.51	2.800		5.100						
		200		0.558		0.700		0.006	0.635
0.55	3.000		6.600						
		350			0.080		0,056		0.068*
0.60	3.350		6.400						
		150		0.041		0.007		0.004	0.032
0.62	3.500		6.500						
		300			0.312		0.347		0.329*
0.67	3.800		5.700						
		650		0.619		0.890		0.020	0.775
0.77	4.450		7.300						

Afin d'obtenir une vérification des calculs, on a cherché les valeurs des travaux soit en prenant les vitesses au bout des différents parcours et calculant les demi-forces vives, soit en relevant au planimètre les aires de la courbe des forces. Comme, ainsi qu'on l'a vu, les vitesses sont obtenues très exactement, la concordance des résultats obtenus est une preuve de l'exactitude des expériences et des corrections.

Pendant les instants où l'oiseau remonte ses ailes, il a à vaincre la résistance de l'air au mouvement propre des ailes, force dont le travail est représenté par les aires négatives de la courbe des forces comptées à partir de l'axe auxiliaire $A_1 A'_1$, comme en E_1GF_1 par exemple (fig. 8). Le travail total de l'oiseau est donc donné par la somme des aires tant positives que négatives, les premières donnant le travail utile des ailes, les autres le travail perdu et non utilisé pour la propulsion.

On voit que les aires des différentes parties de la courbe correspondent bien généralement aux demi-forces vives perdues ou gagnées par le centre de gravité. Il y a quelques écarts, mais il est probable qu'ils sont dus à ce que la méthode chronophotographique ne donnant que des positions successives de l'oiseau, quelques incidents remarquables du mouvement échappent de temps en temps à l'appareil enregistreur, et que les courbes obtenues ne peuvent donner qu'une idée approchée des choses. Quelques sommets des courbes des vitesses et des forces peuvent être un peu plus allongés qu'on a été conduit à les tracer, d'après la direction indiquée par les points voisins, dont la position exacte a été donnée par le calcul; telles qu'on les a obtenues par deux méthodes de calcul différentes, les valeurs des travaux peuvent par conséquent inspirer une certaine confiance.

L'allongement de certains sommets des courbes obtenues ne changerait pas du reste beaucoup les valeurs des aires. Il suffit pour s'en convaincre de jeter les yeux sur la figure ci-contre (fig. 9).

On voit que, si en prenant des épreuves à 1/50 de seconde de distance, on obtient pour les forces une courbe enlaçant les points L, M, N, P obtenus par le calcul, et que les points intermédiaires, qu'on eût obtenus en prenant des épreuves tous les $\frac{1}{100}$ de seconde, soient tels que Q, R, S, il aurait fallu que l'ordonnée du point R fût double de l'ordonnée maximum primitivement tracée pour augmenter l'aire primitive de 1/4 environ au plus.

Dans les tableaux qui précèdent, on a estimé le travail de l'oiseau en prenant des moyennes des valeurs trouvées pour le travail des

forces par les deux méthodes de calcul, et on a marqué d'un astérisque le travail perdu des ailes de l'oiseau et non employé à la propulsion.

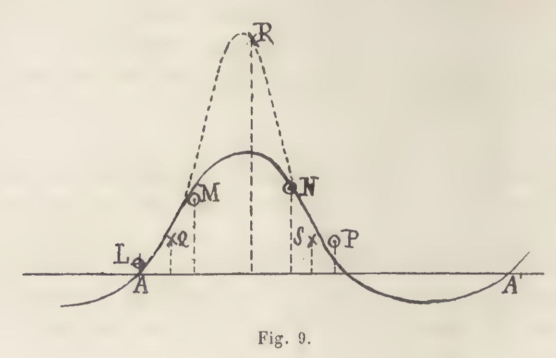


Fig. 9.

On voit que le travail de l'oiseau se résume comme suit, pour la propulsion horizontale :

TEMPS — Secondes.	TRAVAIL UTILE		TRAVAIL PERDU		TRAVAIL TOTAL	
	km.	p. 100.	km.	p. 100.	km.	p. 100.
			Première plaque.			
0.62	2.076	0.605	1.373	0.395	3.449	1.00
			Deuxième plaque.			
0.73	3.039	0.675	1.481	0.325	4.520	1.00

b. *Travail de sustentation.* — Dans le parcours vertical, les forces en jeu sont :

1° La résistance de l'air sur la partie invariable du corps de l'oiseau, qui agit toujours en sens contraire de son déplacement : dans les deux cas étudiés, la vitesse de l'oiseau ayant été constamment négative, c'est-à-dire dirigée vers le bas, cette force a agi pour soutenir l'oiseau ; elle est du reste très variable, mais toujours faible. Car en admettant 3 décimètres carrés pour la surface de la projection du corps de l'oiseau sur un plan horizontal, et admettant que l'épaisseur de l'oi-

seau est égale à sa largeur, on aura une idée de cette résistance en appliquant la formule

$$Q = 0{,}0625 \times 1{,}17 \times 0^{m^2}{,}03 \times V^2.$$

(*Mécanique industrielle* de Poncelet.)

La vitesse verticale de l'oiseau ayant oscillé entre

$$-0{,}200 \quad \text{et} \quad -1{,}800,$$

l'action de l'air sur la partie invariable a oscillé entre les limites extrêmes

$$0^k{,}0009 \quad \text{et} \quad 0^k{,}0071.$$

La résistance subie par l'oiseau est du reste certainement plus faible que ces valeurs, qui représentent la résistance d'un prisme ayant une épaisseur égale à sa largeur, et se déplaçant dans la direction des arêtes verticales, la base ayant 3 décimètres carrés, ou $0^m{,}3$ de long sur $0^m{,}1$ de large. Le corps de l'oiseau présente en effet des formes arrondies et effilées, qui doivent diminuer l'action de l'air. On peut donc négliger cette première force verticale.

2° La force principale que l'oiseau a toujours à vaincre est la pesanteur toujours dirigée vers le bas et qui serait représentée sur les tracés par une droite parallèle à l'axe du O des forces, tracée au-dessous de cet axe à une distance correspondant à $0^k{,}623$.

3° L'oiseau par le mouvement des ailes développe des forces tantôt positives et dirigées en sens contraire de la pesanteur, tantôt négatives et contrariant son mouvement d'élévation. Ainsi qu'on l'a vu pour le mouvement horizontal, les forces auxquelles est soumis le centre de gravité étant représentées à partir de l'axe AA′ par la courbe ABCA′, lorsque l'oiseau est en M, la force qu'il développe réellement est la force représentée par l'ordonnée MB de la courbe augmentée du poids MM_1. De même en N, la force totale à laquelle l'oiseau est soumis est ND et se compose d'une force NN_1 égale à la pesanteur et d'une force N_1D, égale à la résistance de l'air au mouvement des ailes (fig. 7).

Le travail utile de l'oiseau se composera des aires des portions de la courbe des forces situées au-dessus de la droite $A_1A'_1$ représentant le poids. Mais pendant les autres moments du vol, l'oiseau travaille encore un peu, puisqu'il doit détruire la résistance opposée par l'air

au mouvement propre des ailes, force dont le travail est représenté par les segments négatifs de la courbe des forces situés au-dessous de l'axe auxiliaire $A_1A'_1$, qui représente le poids.

En relevant les aires au planimètre, on trouve les résultats suivants :

TEMPS	PARCOURS [1] TOTAUX	PARCOURS [1] SUCCESSIFS	VITESSES [1]	DEMI-FORCES VIVES gagnées. +	DEMI-FORCES VIVES gagnées. −	AIRES DE LA COURBE des forces absolues. +	AIRES DE LA COURBE des forces absolues. −	AIRES DE LA COURBE DES FORCES. Addition faite de la pesanteur. +	AIRES DE LA COURBE DES FORCES. Addition faite de la pesanteur. −	TRAVAIL de L'OISEAU
sec.	mm.	mm.	mètres / sec.	km.	km.	km.	km.	km.	km.	km.
Première plaque.										
0.05 0.07 0.15 0.19 0.22 0.27 0.33 0.39 0.55 0.59	0.0 0.010 0.050 0.070 0.100 0.110 0.120 0.150 0.210 0.220	0.010 0.040 0.020 0.030 0.010 0.010 0.030 0.060 0.010	0.070 1.000 0.230 0.600 0.170 0.700 0.010 1.000 0.030 0.600	0.030 0.011 0.015 0.032	0.032 0.010 0.015 0.032 0.011	0.021 0.012 0.015 0.042	0.016 0.009 0.013 0.022 0.011	0.046 0.029 0.035 0.084	0.013 0.026 0.006 0.016 0.005	0.013* 0.046 0.026* 0.029 0.006* 0.035 0.016* 0.084 0.005*
Deuxième plaque.										
0.03 0.05 0.12 0.19 0.23 0.31 0.33 0.46 0.53 0.61 0.63 0.68	0.010 0.030 0.080 0.130 0.160 0.230 0.260 0.400 0.450 0.510 0.530 0.580	0.020 0.050 0.050 0.030 0.070 0.030 0.040 0.050 0.060 0.020 0.050	0.500 0.140 1.400 0.140 1.200 0.300 1.700 0.030 1.400 0.200 1.300 0.500	0.007 0.067 0.043 0.093 0.061 0.041	0.067 0.046 0.89 0.063 0.053	0.019 0.098 0.087 0.088 0.066 0.041	0.067 0.051 0.096 0.078 0.044	0.044 0.140 0.132 0.160 0.132 0.085	0.035 0.032 0.018 0.039 0.028	0.044 0.035* 0.140 0.032* 0.132 0.018* 0.160 0.039 0.132, 0.022* 0.085

[1] Les parcours et vitesses sont négatifs.

Ici encore, les deux méthodes de calculs employées pour déterminer les travaux des forces auxquelles est soumis le centre de gravité de l'oiseau donnent des résultats suffisamment concordants.

Le travail de l'oiseau dans le mouvement vertical se partage en deux portions : l'une, travail utile destiné à modérer la vitesse de des-

cente ; l'autre, travail perdu dans le frottement des ailes contre l'air dans les mouvements de remontée.

Le tableau suivant donne ce partage :

TEMPS — Secondes.	TRAVAIL UTILE		TRAVAIL PERDU		TRAVAIL TOTAL	
	km.	p. 100.	km.	p. 100.	km.	p. 100.
Première plaque.						
0.54	0.194	0.748	0.066	0.252	0.260	1.00
Deuxième plaque.						
0 65	0.693	0.820	0.152	0.180	0.845	1.00

16. — Résumé et conclusions.

Pour chaque expérience, les points représentant les vitesses et les forces, directement déduites du calcul, offrent des figures faciles à enlacer dans des courbes continues. Les différents coups d'aile présentent des périodes se succédant régulièrement, d'après une loi conforme aux faits d'observation déjà recueillis.

Toutes les causes d'erreur possibles ont été analysées et leurs influences ont été déterminées. Calculées sur des bases certainement exagérées, leurs valeurs restent toujours faibles pour les vitesses et les travaux mesurés, et ne deviennent importantes que pour les forces, tout en restant une fraction des forces maxima, que le calcul fournit.

La concordance des résultats obtenus par le calcul des relevés des deux expériences qui ont été effectuées à peu près dans les mêmes conditions est une nouvelle présomption en faveur de l'exactitude des résultats obtenus.

Leur examen conduit aux conclusions suivantes :

L'application des formules de la résistance de l'air au mouvement des ailes de l'oiseau étudié montre que l'air pouvait à certains moments du vol offrir à l'oiseau un appui au moins égal à $3^{k},400$, et par suite bien supérieur à son poids. Il ne semble pas qu'il y ait lieu de douter que l'oiseau puisse développer une telle force à certains instants : c'est en effet un fait d'observation que le rapport entre les efforts

extérieurs disponibles sur les muscles d'un animal d'un genre déterminé et son propre poids augmente quand le poids diminue. Le calcul donne même des valeurs supérieures pour certains moments (4e coup d'aile de la deuxième expérience).

Les forces les plus grandes sont celles développées pour la propulsion en avant, au commencement de chaque coup d'aile ; pendant l'élévation des ailes, l'oiseau obéit la plupart du temps à la résistance de l'air, mais trouve encore quelquefois le moyen de développer une force de propulsion effective malgré la position défavorable des ailes. Le travail de sustentation n'est au contraire interrompu que pendant de courts instants, plus fréquents que les périodes de repos observées dans la propulsion. De cette façon l'oiseau laisse le moins possible la pesanteur avoir prise sur lui.

Il n'existe pas de rapport constant entre les forces développées horizontalement et verticalement. La multiplicité des positions prises par l'aile ne le permet pas. Si on relève au commencement de chaque coup d'aile les forces développées positivement dans les deux sens horizontaux et verticaux, on peut en déduire la résultante totale représentant l'appui de l'aile sur l'air, l'inclinaison moyenne des éléments de l'aile, et la vitesse relative moyenne par rapport à l'air ambiant, nécessaire pour faire naître cette force sur un plan de 0m,065.

EXPÉRIENCES	COUP D'AILE	COMPOSANTES		RÉSULTANTE	INCLINAISON DE L'AILE sur l'horizon.	VITESSE MOYENNE relative correspondante.
		Horiz.	Vertic.			
Première.	1er......	1.520	0.523	1.600	71°	11m6
	2e.......	2.570	0.327	2.59	83°	15.0
		1.960	1.175	2.30	59°	14.0
	3e.......	0.570	2.080	2.16	16°	13.5
		1.108	0.877	1.45	52°	11.0
		1.778	0.482	1.85	75°	12.6
		1.300	0.950	1.62	54°	11.8
Deuxième.	2e.......	0.222	0.268	0.35	39°	5.4
		2.170	0.920	2.34	67°	14.0
	3e.......	0.475	0.477	0.67	45°	7.50
		0.316	1.044	1.09	17°	9.60
		1.425	1.219	1.88	50°	12.60
		0.316	2.427	2.44	8°	14.50
		1.425	1.140	1.82	52°	12.50

Dans la dernière expérience, on trouve deux valeurs de 4 kilos pour la force de propulsion horizontale, correspondante à une vitesse du

centre de pression de $18^{m},6$. A cette vitesse l'aile paraît avoir été complètement tordue, et avoir frappé l'air par en dessous, car cette valeur est accompagnée de deux valeurs de la force verticale, — 2,472 et — 0,775 toutes deux de même signe et plus grandes que le poids.

Si l'on rapporte les travaux accomplis horizontalement et verticalement par l'oiseau, en les ramenant à une durée uniforme d'une seconde, on trouve les résultats suivants :

EXPÉRIENCES	DIRECTION	TRAVAIL UTILE		TRAVAIL PERDU	
		Valeur.	P. 100.	Valeur.	P. 100.
		km.		km.	
1re expérience....	Horizontale.	4.450	0.605	2.215	0.395
	Verticale ...	0.360	0.748	0.121	0.252
	Totaux...	4.810	»	2.236	»
Rapport du travail perdu au travail utile............. 0.465					
		km.		km.	
2e expérience.....	Horizontale.	4.165	0.675	2.030	0.325
	Verticale ...	1.066	0.820	0.234	0.180
	Totaux...	5.231	»	2.264	»
Rapport du travail perdu au travail utile............. 0.435					

Dans les deux cas, le travail total en une seconde est de :

$7^{km},046$ pour la première expérience et $7^{km},495$ pour la seconde expérience.

Dans la première expérience, pour une chute de 220 millimètres, l'oiseau a dépensé un travail vertical utile de $0^{km},194$, tandis que le travail de la pesanteur était de $0^{km},137$.

Dans la seconde, pour une chute de 570 millimètres, l'oiseau a dépensé un travail vertical utile de $0^{km},693$, tandis que le travail de la pesanteur s'élevait à $0^{km},355$ seulement.

La différence de ces deux résultats s'explique à l'inspection des courbes. On voit en effet que dans la deuxième expérience l'oiseau a mal volé, ses coups d'ailes n'ont pas une durée sensiblement constante comme dans le premier cas; le troisième coup d'aile est très long et le quatrième précipité : il s'est produit une vitesse de descente très grande à ce moment, et l'oiseau a dû dépenser beaucoup pour la diminuer.

Le rapport du travail utile de sustentation au travail horizontal est très faible :

0,081 pour la première expérience, 0,25 pour la seconde.

Presque tout le travail perdu provient de la résistance au mouvement de propulsion horizontal. Car le travail perdu vertical n'est que les 0,055 du travail perdu horizontal dans la première expérience et les 0,115 dans la deuxième.

Les photographies obtenues ne représentent pas l'oiseau dans son plein vol ; la nécessité de guider l'oiseau par un lien léger attaché à une boucle coulissant sur une tige horizontale doit le gêner, et le forcer à développer plus de travail que dans un vol ordinaire. De plus, on n'a pu encore enregistrer que l'essor, et c'est un fait d'observation que cette partie du vol est la plus pénible pour l'oiseau. Ainsi s'expliquent les valeurs considérables pour le travail total développable en une seconde.

CH.-M. DE LABOURET.

17 mai 1889.

DISSOCIATION DES MOUVEMENTS D'UN OISEAU



Phototypie Balagny

26 IMAGES D'UN PIGEON, OBTENUES EN 1/2 SECONDE; — POSE $\frac{1''}{8000}$

TABLE ALPHABÉTIQUE DES MATIÈRES

CONTENUES DANS CE VOLUME

D

E

F

Z

FIN DE LA TABLE ALPHABÉTIQUE DES MATIÈRES.

TABLE DES FIGURES

CONTENUES DANS CE VOLUME

ANATOMIE.

APPAREILS INSCRIPTEURS DES MOUVEMENTS.

APPAREILS MESUREURS DE LA RÉSISTANCE DE L'AIR.

APPAREILS PHOTOGRAPHIQUES.

APPAREILS IMITANT LE VOL RAMÉ.

FIN DE LA TABLE DES FIGURES.

TABLE

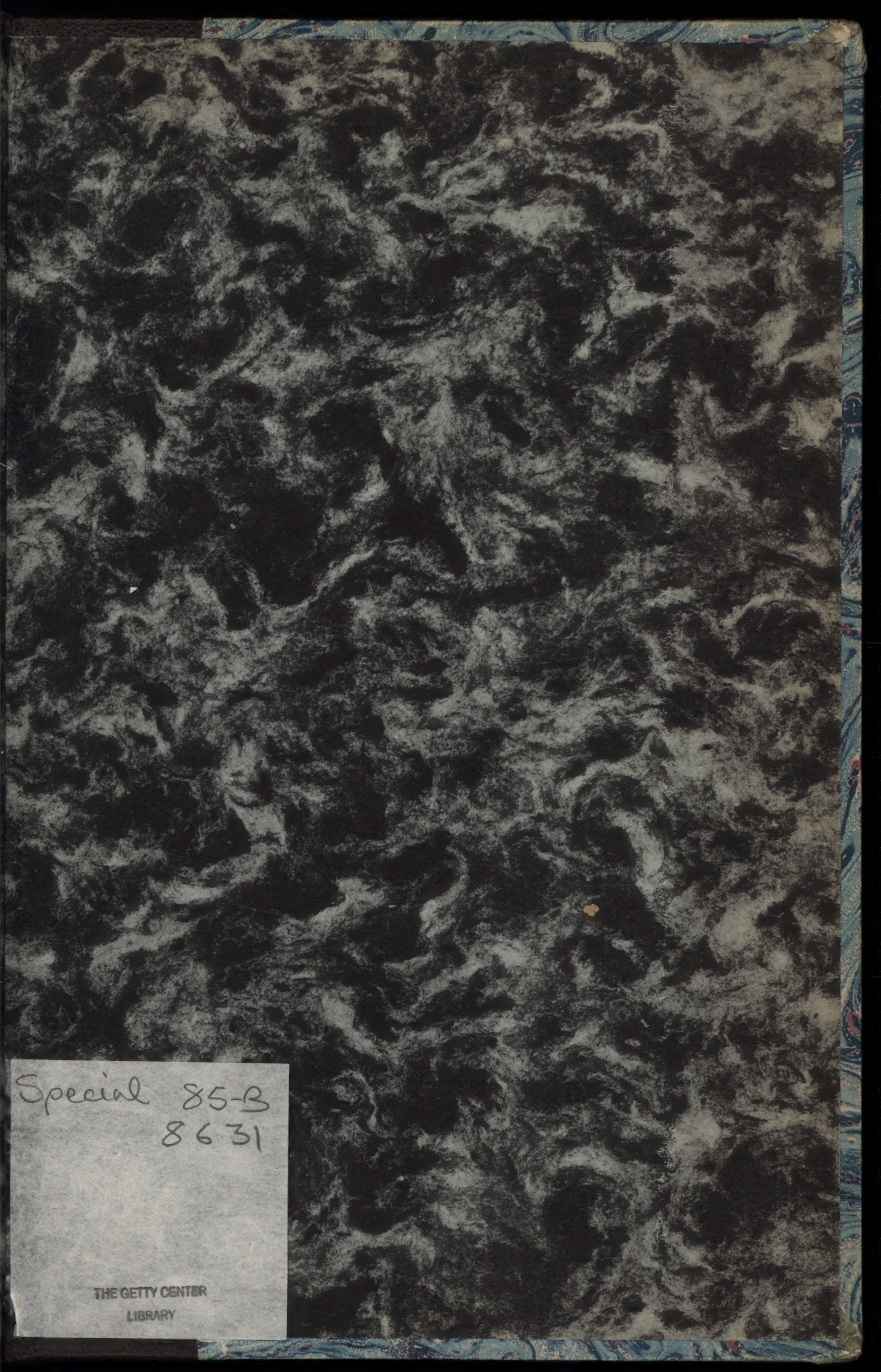
ALPHABÉTIQUE DES NOMS D'AUTEURS

CITÉS DANS CE VOLUME

FIN DE LA TABLE DES NOMS D'AUTEURS.

3093-89. — CORBEIL. Imprimerie CRÉTÉ.




Special 85-B
8631
THE GETTY CENTER
LIBRARY

